

GEO 511 Masterarbeit

Analyse von hydro-meteorologischen Zeitreihen im südlichen Alptal

Modellierung und Zeitreihenanalyse von Abflussdaten unterschiedlicher Einzugsgebiete im südlichen Alptal während der Zeitperiode 1968 bis 1984.

David Reist

Matrikelnummer 10-713-501

reist_david@hotmail.com

30. September 2015

Betreuung durch:

Benjamin Fischer

Prof. Dr. Jan Seibert

Abteilung Hydrologie und Klima (H2K)

Geographisches Institut

Universität Zürich

Zusammenfassung

Im Alptal (SZ), in den schweizerischen Voralpen gelegen, begann 1963 ein umfangreiches hydrologisches Monitoring der Eidgenössischen Forschungsanstalt Wald, Schnee und Landschaft. Durch die hydrologische Erforschung von Einzugsgebieten können Prozesse des Wasserhaushalts und ihre Variabilität in Raum und Zeit besser verstanden werden und durch die Datenanalyse werden Vorhersagen von zukünftigen Ereignissen unter sich verändernden Bedingungen ermöglicht. Insbesondere aufgrund prognostizierten Klimaveränderungen ist die Vorhersage des Abflussverhaltens unter verändernden Niederschlagsverhältnissen und erhöhten Temperaturen von besonderer Bedeutung um sich an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Die Schweiz ist besonders stark von Naturgefahren wie Hochwasser, Murgängen und Erdbeben betroffen und ein besseres Verständnis der Wasserhaushaltsprozesse ist essentiell um die Schäden solcher Katastrophen zu verringern. Insbesondere die hydrologische Modellierung erlaubt Veränderungen und ihre Auswirkungen auf den Wasserkreislauf zu dokumentieren. Das HBV-Modell eignet sich besonders gut für die Modellierung von Abflussdaten, aufgrund des geringen Bedarfs an Eingabedaten und der einfachen Bedienung. Das HBV-Modell ist ein konzeptuelles Niederschlag-Abfluss-Modell und benötigt lediglich die Eingabedaten Temperatur, Niederschlag und Verdunstung. Für die Modellierung werden komplette Datensätze benötigt, welche bei hydro-meteorologischen Daten sehr oft nicht gegeben sind. Auch die Untersuchungen in den sieben Einzugsgebieten im Alptal wurden durch die Zerstörung der Messstationen unterbrochen und dadurch ein inkompletter Datensatz generiert für den Zeitraum 1968 bis 1984. Damit diese Daten für die Modellierung verwendet werden konnten mussten die analogen Datensätze digitalisiert, manuell korrigiert und komplettiert werden. Durch geeignete lineare und multiple lineare Regression und die Thiesen-Polygon-Methode wurden komplette Datensätze generiert, welche für die Modellierung verwendet werden konnten. Anhand der Kalibrierung des HBV-Modells mit bestimmten Parametergrenzwerten und der standardisierten Modellstruktur sowie dem Gütemass gemäss Lindström wurden die Abflussdaten für die sieben untersuchten Einzugsgebiete simuliert. Anhand der Analyse der originalen Temperatur-, Niederschlag- und Abflussdaten sowie der Vergleich der inter- und extrapolierten beziehungsweise modellierten Zeitreihen erlaubt die Charakterisierung der sieben kleinen Einzugsgebiete sowie die Einordnung der Veränderung der Umweltparameter der Voralpen. Die ähnlichen Eigenschaften der Einzugsgebiete bezüglich Geologie, Topographie und Oberflächenbeschaffenheit ermöglicht einen guten Vergleich der Abflussdynamik unter sich verändernden Umweltbedingungen. Das Verständnis der hydrologischen Prozesse im südlichen Alptal ermöglicht die Regionalisierung auf andere Gebiete. Jedoch ist die Regionalisierung nur begrenzt möglich, wie es sich in dieser Arbeit herausgestellt hat.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen herzlich bedanken, die mit ihrer fachlichen und persönlichen Unterstützung zur Fertigstellung meiner Masterarbeit beigetragen haben.

Besonderen Dank gilt meinen Betreuungspersonen Benjamin Fischer und Prof. Dr. Jan Seibert, welche mich während der ganzen Zeit unterstützten und mir wertvolle Ratschläge gaben.

Weiter möchte ich mich bei Manfred Stähli bedanken, welcher meine Anlaufstelle beim WSL war und mir Fragen zu den Datensätzen beantwortete, sowie das hydrologische Datenarchiv der WSL zu Verfügung stellte.

An dieser Stelle möchte ich mich ausserdem bei Ellen Cerwinka und Yves Götz bedanken, welche bereits viel Zeit in die Digitalisierung der Daten und erste Analysen investierten.

Daneben gilt mein Dank Maria Staudinger für die potentiellen Evaporationsdaten des Alptals, welche mir halfen einen ersten Eindruck über diese hydro-meteorologische Grösse zu gewinnen.

Ergänzend bedanke ich mich bei Manuela Brunner von der Meteo Schweiz für das Beschaffen von meteorologischen Daten von Einsiedeln für die Berechnung der potentiellen Evaporation.

Weiter bedanke ich mich bei meinen Studienkollegen Patrice Frei, Oliver Deseö, Jonas Hänseler und Ramón Haldi für wertvolle Ratschläge bei Unklarheiten bezüglich der Statistik und GIS Angelegenheiten.

Abschliessend bedanke ich mich bei Lisa Studer, Nora Studer und Joël Kopp, welche viel Zeit in die Korrektur meiner Arbeit investiert haben und mir wertvolle Tipps bezüglich der Formatierung gaben.

Inhalt

Zusammenfassung	2
Danksagung	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Symbolverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1. Einleitung	11
1.1 Stand der Forschung im Alptal	12
1.2 Zielsetzung	13
1.3 Gliederung der Masterarbeit	13
2. Forschungsgebiet – Alptal	15
2.2 Untersuchungsgebiet Alptal	15
2.2.1 Geologie	17
2.2.2 Pedologie	18
2.2.3 Vegetation und Landbeschaffenheit	18
2.2.4 Klima	20
2.3 Die untersuchten Teileinzugsgebiete	21
2.4 Alptaler Messnetz	23
3. Methoden	26
3.1 Originale Daten, ihre Korrektur und Qualität	26
3.1.1 Temperaturdaten	28
3.1.2 Niederschlagsdaten	30
3.1.3 Abflussdaten	32
3.2 Inter- und extrapolierte Daten	34
3.2.1 Temperaturdaten	35
3.2.3 Niederschlagsdaten	39
3.3 Modellierte Daten	40
3.3.1 HBV-Modell und seine Modellstruktur	40
3.3.2 Eingabedaten	41
3.3.3 Modellkalibrierung	44
3.3.4 Wahl der Modellstruktur	45
3.2.8 Parameterwahl	46
3.2.9 Modellgüte	47
4. Resultate	49
4.1 Originale Zeitreihen	49
4.1.1 Temperaturdaten	49
4.1.2 Niederschlagsdaten	53
4.1.3 Abflussdaten	58
4.2 Inter- und extrapolierte Zeitreihen	64

4.2.1 Temperaturdaten	65
4.2.2 Niederschlagsdaten	70
4.3 Modellerte Zeitreihen	78
4.3.1 Abflussdaten	78
4.3.2 Modellgüte der Abflusssimulationen	88
4.3.3 Wasserbilanzen der Einzugsgebiete	89
4.3.4 Unterschiedliche Parameterausprägungen bei der Modellierung der Abflussdaten	90
5. Interpretation und Diskussion	92
5.1 Originale Zeitreihen	92
5.1.1 Temperaturdaten	92
5.1.2 Niederschlagsdaten	93
5.1.3 Abflussdaten	95
5.2 Inter- und extrapolierte Zeitreihen	97
5.2.1 Temperaturdaten	97
5.2.2 Niederschlagsdaten	99
5.3 Modellerte Zeitreihen	101
5.3.1 Abflussdaten	101
5.3.2 Modellgüte der Abflusssimulationen	104
5.3.3 Wasserbilanzen der Einzugsgebiete	105
5.3.4 Unterschiedliche Parameterausprägung bei der Modellierung der Abflussdaten	107
6. Fazit und Ausblick	109
7. Literatur	111
Hades, 2015. Willkommen bei den Grundlagen- und Geodaten des HADES. http://www.hadesdaten.unibe.ch/ (aufgerufen am 18.09.2015).	113
8. Anhang	118
A. Entwicklung zum Forschungsstandort Alptal	118
B. Hinweise zur Komplettierung der Niederschlagszeitreihen	119
C. Historische Entwicklung und Modellstruktur des HBV-Modells	120
C.1 Modellstruktur	120
Persönliche Erklärung	123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte des Alptals mit den sieben untersuchten Einzugsgebieten, dem Gewässernetz und eingezeichnete Höhenstufen. _____	16
Abbildung 2: Ursprüngliche Abflussstation im Vogelbachgebiet von 1968 – 1974 (a) und neue Abflussmessstation im Erlenbachgebiet seit 1978 (b). _____	23
Abbildung 3: Übersicht über die untersuchten Einzugsgebiete und den Messstationen im südlichen Alptal. _____	25
Abbildung 4: Überblick über die verfügbaren Temperaturzeitreihen im südlichen Alptal von 01.01.1968 bis 31.12.1984. _____	28
Abbildung 5: Lufttemperaturzeitreihen der Einzugsgebiete Vogel-, Lümpenen- und Etterenbach für die Zeitperiode vom 01.01.1968 bis 31.12.1984: Lufttemperatur (T_L), unplausible Tageswerte (Kreis). _____	29
Abbildung 6: Analoges Niederschlagsdatenblatt des Gämshbachgebiets. _____	30
Abbildung 7: Übersicht über die vorhandenen Abflussdaten der untersuchten Einzugsgebiete von 01.01.1968 bis 31.12.1984. _____	32
Abbildung 8: Double-Mass-Kurven des Vogelbachs (a) und des Lümpenenbachs (b) in Bezug auf die täglichen Abflusswerte: Einzugsgebiet (EZG), 1:1-Linie (gestrichelte Linie), Double-Mass-Kurve (durchgezogene Linie). _____	34
Abbildung 9: Konstruktion von Thiessen-Polygonen (Haggett et al., 1977): Verbindungslinie (d). _____	37
Abbildung 10: Polygonflächen (Thiessen) für die Berechnung der Lufttemperaturen des Teufbachgebiets (ArcGIS). _____	38
Abbildung 11: Polygonflächen (Thiessen) für die Berechnung der Gebietsniederschläge sowie die Niederschlagsmessstationen und untersuchten Einzugsgebiete (ArcGIS). _____	39
Abbildung 12: Schematische Struktur des HBV-Modells (modifiziert nach Seibert, 1999). _____	41
Abbildung 13: Standardisierte Modellstruktur des HBV-Modells (modifiziert nach HBV-light Hilfe 4.0.0.9). _____	46
Abbildung 14: Jahresmittelwerte der originalen Lufttemperaturzeitreihen der untersuchten Einzugsgebiete von 1968 bis 1984 sowie Trendlinien der Gebiete des Vogel- und des Lümpenenbachs: Lufttemperatur (T_L), Trendlinien (gepunktet). _____	49
Abbildung 15: Temperaturentwicklung während dem Zeitraum von 1968 bis 1984 im Vogelbachgebiet in Bezug auf die Jahreszeiten sowie die dazugehörigen Trendlinien: Lufttemperatur (T_L), Winter (W), Frühling (F), Sommer (S), Herbst (H), Trendlinien (gepunktet). _____	50
Abbildung 16: Kastendiagramme der originalen Lufttemperaturtageswerte der untersuchten Einzugsgebiete von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L), Mittelwert (Kreuz), Ausreisser (Dreieck), Min/Max (Kreis). _____	50
Abbildung 17: Mittlere monatliche Lufttemperaturen der bemessenen Einzugsgebiete über die gesamte Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L). _____	51
Abbildung 18: Jährliche Niederschlagssummen aller höher gelegenen Messstationen von 1968 bis 1984 sowie die Trendlinie der Jahresniederschlagssummen des Totalisators im Einzugsgebiet des Vogelbachs (VOG A): N (Niederschlag), Trendlinie (gepunktet). _____	53
Abbildung 19 Vergleich der durchschnittlichen monatlichen Abflusssummen der vier Jahreszeiten in den Jahren von 1968 bis 1984 sowie ihre Trendlinien: originaler Datensatz (gestrichelt), modellierter Datensatz (modelliert), Trendlinien (gepunktet).a) _____	90
Abbildung 20: Mittlerer Jahresniederschlag der nach Höhenzonen gegliederten Gebieten für die Periode 1961 bis 1990, nach Schädler und Weingartner, 2002b) und einem linearen Niederschlagsgradienten (+80 mm / 100 m) von Kirchhofer und Sevruc (1992).Abbildung 51: Resultate von zwei Modellparametern des Erlenbachs nach 20000 Modellläufen (jeder Punkt repräsentiert einen Modelllauf): (a) CFMAX als ein Beispiel eines gut definierten Parameter und (b) FC für ein Beispiel eines schlecht definierten Parameter. _____	90
Abbildung 21: Reduktion der potentiellen Evaporation abhängig von der Bodenfeuchte (modifiziert nach Uhlenbrook, 1999).Abbildung 22: Mittlerer Jahresniederschlag der nach Höhenzonen gegliederten Gebieten für die Periode 1961 bis 1990, nach Schädler und Weingartner, 2002b) und einem linearen Niederschlagsgradienten (+80 mm / 100 m) von Kirchhofer und Sevruc (1992). _____	93
Abbildung 23.2: Reduktion der potentiellen Evaporation abhängig von der Bodenfeuchte (modifiziert nach Uhlenbrook, 1999). _____	121
Abbildung 24Abbildung 25: Reduktion der potentiellen Evaporation abhängig von der Bodenfeuchte (modifiziert nach Uhlenbrook, 1999). _____	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte des Einzugsgebiets der Alp (BAFU, 2012; Swisstopo, 2014).	15
Tabelle 2: Geologie im Alptal (BAFU, 2012).	17
Tabelle 3: Eigenschaften der Alptaler Böden in % der gesamten Fläche (BAFU, 2012).	18
Tabelle 4: Landnutzung und Waldzusammensetzung (BFS, 1992, 1997).	19
Tabelle 5: Übersicht über die Eigenschaften der sieben untersuchten Einzugsgebiete im südlichen Alptal: N/A (Nicht in der Literatur vorhanden). Flächen-, Höhen-, Distanz- und Expositionsdaten aus dem DHM berechnet (Swisstopo, 2014). Weitere Angaben aus Keller (1970a), Holliger (1984), Burch (1994) und Burch et al. (1996a).	21
Tabelle 6: Übersicht über die Messhöhen der Abflussmessstation der untersuchten Einzugsgebiete (Swisstopo, 2014).	24
Tabelle 7: Übersicht über die Niederschlagsmessstationen und ihre Eigenschaften in Bezug auf Distanz, Höhe und Exposition (WSL, 2001; Swisstopo, 2014).	25
Tabelle 8: Übersicht über die manuell angepassten Lufttemperaturwerte.	29
Tabelle 9: Übersicht über die Datenqualität der Temperaturzeitreihen der untersuchten Gebiete. Keine Daten sind vom Einzugsgebiet des Teufbachs verfügbar: Homogenitäts-Test (Ja, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist homogen; Nein, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist inhomogen), Stationaritäts-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist stationär (keine Einheitswurzel); Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist nicht stationär (Einheitswurzel), Trend-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe zeigt Trend; Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe zeigt kein Trend), N/A (nicht auswertbar), Double-Mass-Kurve (0, keine Abweichung von der 1:1 Linie).	30
Tabelle 10: Übersicht über die Datenqualität der Niederschlagszeitreihen der verschiedenen Messstationen im südlichen Alptal: Homogenitäts-Test (Ja, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist homogen; Nein, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist inhomogen), Stationaritäts-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist stationär (keine Einheitswurzel); Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist nicht stationär (Einheitswurzel), Trend-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe zeigt Trend; Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe zeigt kein Trend), N/A (nicht auswertbar), Double-Mass-Kurve (0, keine Abweichung; - geringe Unterschätzung, --mittlere Unterschätzung, + geringe Überschätzung in Bezug zur 1:1 Linie).	32
Tabelle 11: Fehlende Datenwerte in den Abflusszeitreihen und ihre Interpolationsart.	33
Tabelle 12: Übersicht über die Datenqualität der Abflusszeitreihen der verschiedenen Einzugsgebiete im südlichen Alptal: Homogenitäts-Test (Ja, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist homogen; Nein, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist inhomogen), Stationaritäts-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist stationär (keine Einheitswurzel); Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist nicht stationär (Einheitswurzel), Trend-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe zeigt Trend; Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe zeigt kein Trend), N/A (nicht auswertbar), Double-Mass-Kurve (0, keine Abweichung; - geringe Unterschätzung, --mittlere Unterschätzung, --- grobe Unterschätzung, + geringe Überschätzung, ++ mittlere Überschätzung, +++ grobe Überschätzung in Bezug zur 1:1 Linie).	33
Tabelle 13: Korrelationsmatrix bezüglich der Lufttemperatur zwischen dem Vogel- und Lümpenenbachgebiet: 1 = Perfekte Korrelation, 0 = keine Korrelation.	35
Tabelle 14: Koeffizienten der Anpassungsgüte aus der Regressionsanalyse zwischen dem Lümpenen- und dem Vogelbachgebiet: Bestimmtheitsmass (R^2), Mittlere quadratische Abweichung (MSE), Wurzel aus der mittleren, quadratischen Abweichung (RMSE).	35
Tabelle 15: Output der Varianzanalyse der Statistiksoftware XLSTAT: Zahl der Freiheitsgrade (DF).	36
Tabelle 16: Überblick über die verwendeten erklärenden Variablen für die Berechnung der fehlenden Datenwerte: Bestimmtheitsmass (R^2)	37
Tabelle 17: Aus den Polygonflächen (Thiessen) resultierender prozentualer Anteil, welcher für die Berechnung der Gebietsniederschläge relevant waren.	40
Tabelle 18: Messgrößen zur Berechnung der potentiellen Verdunstung (Zeitintervall: M= Monat, T=Tag, S= Stunde) (aus Spreafico und Weingartner, 2005).	42
Tabelle 19: Vergleich unterschiedlicher Modellstrukturen der Gebiete Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach anhand der Modelleffizienz (ME), wobei 1 eine perfekte und $-\infty$ eine schlechte Übereinstimmung zwischen der simulierten und beobachteten Abflussdaten darstellt, sowie der mittleren Differenz (MD): verteilt (vt.), Grundwasser (GW).	45

Tabelle 20: Übersicht über die Parameter des HBV-Modells und ihren Grenzwerten für die Kalibrierung im HBV-Modell.	47
Tabelle 21: Statistische Kennwerte der gemessenen Tageslufttemperaturdaten im südlichen Alptal von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}), Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ), Variationskoeffizient (v).	52
Tabelle 22: Korrelationsmatrix der untersuchten Einzugsgebiete nach Spearman.	52
Tabelle 23: Übersicht über die durchschnittlichen, jährlichen Niederschlagssummen aller Niederschlagsmessstationen im südlichen Alptal: Niederschlagssumme (ΣN), oberes Messniveau (A), unteres Messniveau (B).	55
Tabelle 24: Statistische Kennzahlen der Tagesniederschläge aller untersuchten Messstationen über die Periode von 1968 bis 1984: Anzahl (n), Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}).	57
Tabelle 25: Jährliche Abflussmittelwerte der untersuchten Einzugsgebiete im Zeitraum von 1968 bis 1984: Abfluss (Q).	58
Tabelle 26: Statistische Kennwerte aller Einzugsgebiete für die Abflusstageswerte vom 01.08.1973 bis 11.06.1974: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}), Summe (Σ), Standardabweichung (σ).	62
Tabelle 27: Vergleich zwischen den durchschnittlichen Monatstemperaturen der originalen und komplettierten Datensätze in Bezug auf die maximalen, mittleren und minimalen monatlichen Lufttemperaturen.	68
Tabelle 28: Statistische Kennzahlen der Lufttemperaturtageswerte der sieben Einzugsgebiete aus der gesamten Zeitperiode von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}).	69
Tabelle 29: Übersicht über die durchschnittlichen, jährlichen Niederschlagssummen aller Niederschlagsmessstationen im südlichen Alptal: Niederschlagssumme (ΣN), oberes Messniveau (A), unteres Messniveau (B).	71
Tabelle 30: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagssummen der originalen und kompletten Datensätze für die Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 anhand der Differenz.	73
Tabelle 31: Maximale Niederschlagsmengen und das dazugehörige Datum des Ereignisses sowie der Tagesmittelwert aller Messstationen für die Zeit von 1968 bis 1984.	74
Tabelle 32: Jahresmittelwerte der Gebietsniederschläge von 1968 bis 1984.	75
Tabelle 33: Statistische Kennzahlen der Tageswerte der Gebietsniederschläge von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}), Trockentag = < 0.5 [mm d^{-1}] Niederschlag, Regentag = ≥ 0.5 [mm d^{-1}] Niederschlag.	78
Tabelle 34: Statistische Eckdaten zu den modellierten jährlichen Abflussmengen der untersuchten Einzugsgebiete (Abb. 40): Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}), Standardabweichung (σ).	79
Tabelle 35: Statistische Kennwerte der Tagesabflussdaten von 1968 bis 1984: Mittelwert (\bar{x}).	82
Tabelle 36: Korrelationsmatrix nach Spearman der Abflusszeitreihen der untersuchten Bäche.	83
Tabelle 37: Differenzen zwischen den originalen und den modellierten monatlichen Tagesabflussraten aller Einzugsgebiete von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}).	87
Tabelle 38: Kalibrierungsergebnisse der Abflusssimulationen der untersuchten Bäche von 1968 bis 1984 anhand verschiedener Gütemasse: Bestimmtheitsmass (R^2), Modelleffizienz (R_{eff}), Effizienz für Basisabflüsse ($\log R_{\text{eff}}$), Volumenfehler (VF), mittlere Differenz (MD), Lindström-Mass (LM), Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (r_s).	88
Tabelle 39: Langjährige mittlere Abfluss-, Niederschlags- und Verdunstungssummen für die sieben untersuchten Einzugsgebiete im Zeitraum von 1968 bis 1984. In Bezug auf die Abflusssummen sind einerseits die simulierten und andererseits die beobachteten Abflusssummen dargestellt. In Bezug auf die Verdunstungssummen werden einerseits die aktuelle und andererseits die potentielle Verdunstung abgebildet: Summe (Σ), Abfluss (Q), Niederschlag (N), aktuelle Evaporation (E_a), potentielle Evaporation (E_p).	89
Tabelle 40: Übersicht der Parameterausprägungen des HBV-Modells der untersuchten Einzugsgebiete bei der Modellierung ihrer Abflussdaten.	91
Tabelle 41: Vergleich der durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen der Gebiete Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach zwischen den berechneten Gebietsniederschlägen und denjenigen aus der Literatur.	100
Tabelle 42: Vergleich der durchschnittlichen Jahresabflusssummen der Gebiete Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach zwischen den modellierten Werte und denjenigen aus der Literatur.	101
Tabelle 43: Vergleich von Verdunstungswerten der Gebiete Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach zwischen Burch (1994), Stähli und Badoux (2015), der berechneten sowie der modellierten Verdunstung.	105

Symbolverzeichnis

\emptyset	=	Durchschnitt
T_L	=	Lufttemperatur
R^2	=	Bestimmtheitsmass, Determinationskoeffizient
D	=	Verbindungsline
E_p	=	Potentielle Evaporation
E_a	=	Aktuelle Evaporation
s	=	Steigung der Sättigungsdampfcurve
γ	=	Psychrometererkonstante
$f(v)$	=	Von Windgeschwindigkeit und Bewuchshöhe abhängige Funktion
L	=	spezifische Verdunstungswärme für 1mm Verdunstungshöhe
G	=	Bodenwärmestrom
σ	=	Standardabweichung
σ^2	=	Varianz
v	=	Variationskoeffizient
\bar{x}	=	Arithmetisches Mittel
d_s	=	Schneefalltage
d_m	=	Minustag
N	=	Niederschlag
n	=	Anzahl
Q	=	Abfluss
Σ	=	Summe
F	=	Frühling
S	=	Sommer
H	=	Herbst
W	=	Winter

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	=	Bundesamt für Umwelt
BFS	=	Bundesamt für Statistik
CH1903	=	Schweizer Landeskoordinaten
DHM	=	Digitales Höhenmodell
EAFV	=	Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen
EZG	=	Einzugsgebiet(e)
GIS	=	Geographisches Informationssystem
HBV	=	konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell
IDW	=	Inverse Distance Weighting
SMHI	=	Schwedisches meteorologisches und hydrologisches Institut
SZ	=	Kanton Schwyz
WSL	=	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
VOG	=	Vogelbach
LUM	=	Lümpenenbach
GAM	=	Gämschbach
TFB	=	Teufbach
ETT	=	Etterebach
ERL	=	Erlenbach
FRI	=	Frifangbach
N/A	=	Nicht in der Literatur vorhanden
SNHT	=	Standardhomogenitätstest
ADF	=	Augmented Dickey-Fuller Test (Einheitswurzeltest)
KPSS	=	Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin Test
MSE	=	Mittlere quadratische Abweichung
RMSE	=	Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung
DF	=	Freiheitsgrade
GAP	=	Genetischer Algorithmus Optimierung gemäss Powell

1. Einleitung

Die Erforschung von hydrologischen Einzugsgebieten erlaubt Einsichten in die Prozesse des Wasserhaushaltes und ihrer Variabilität in Raum und Zeit (Lang et al., 1994). Der Vergleich von hydro-meteorologischen Daten kleiner Einzugsgebiete ermöglicht einen vertieften Einblick in die hydrologische Funktionsweise von Einzugsgebieten mit unterschiedlichen klimatischen und physiographischen Faktoren. Darüber hinaus ist es nützlich für das Verständnis der Natur und der Stärke von hydrologischen Veränderungen (Lana-Renault et al., 2011).

Ein erweitertes Prozessverständnis aufgrund der Verknüpfung der Erforschung von Einzugsgebieten mit der hydrologischen Modellierung ermöglicht eine Untersuchung der natürlichen und anthropogenen Veränderungen in hydrologischen Systemen (Todini, 1988). Mögliche Veränderungen können anhand der Wechselwirkungen einzelner Systembestandteile und der Vorhersagen der wichtigsten Wasserkreislaufparameter ermittelt werden (Beven, 1989). Modelle, mit denen Wasserbilanzen erstellt werden, sind oftmals die Voraussetzung um Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt, ihrer Ursachen und Wirkungen verstehen zu können (Wohlrab et al., 1992). Aus diesem Grund können beispielsweise Folgen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf die hydrologische Dynamik simuliert werden (Pfützner et al., 1992). Für die hydrologische Modellierung von Einzugsgebieten wird die quantitative Erfassung der Wasserkreislaufkomponenten und ein genaues Verständnis des hydrologischen Systems vorausgesetzt (Todini, 1988). Aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Schwankungen von Wasserhaushaltsgrössen sind Untersuchungen erforderlich über die Wahrscheinlichkeit, mit der sich hydrologische Gegebenheiten wie beispielsweise Hoch- und Niedrigwasser einstellen. Für solche Untersuchungen werden Daten benötigt, welche über einen längeren Zeitraum ohne grosse Unterbrechungen erhoben wurden. Eine längere Zeitreihe weist eine grössere Vielfalt möglicher hydrologischer Gegebenheiten auf und gibt das typische Verhalten des hydrologischen Systems wider (Wittenberg, 2011).

Die Analyse von Zeitreihen wird für verschiedenste hydro-meteorologischen Daten verwendet, wie beispielsweise Temperaturdaten, Niederschlagsdaten (Mirza et al., 1998; Pugacheva et al., 2003; Astel et al., 2004) und Abflussdaten (Radziejewski et al., 2000; Fanta et al., 2001; Adeloje und Montaseri, 2002). Aufgrund von Zeitreihenanalysen können hydrologische Ereignisse vorhergesagt (Machiwal und Jha, 2008), fehlende Daten ergänzt (Machiwal und Jha, 2008), mögliche Trends festgestellt (Kite, 1989; Khan, 2001) und mathematische Modelle entwickelt werden, um dadurch zusätzliche hydrologische Messungen zu berechnen. Werden verschiedene Zeitreihen unterschiedlicher Stationen miteinander verglichen, so müssen sie sich über die gleiche Zeitperiode erstrecken (Wittenberg, 2011).

Jedoch gibt es eine Vielzahl von Gründen, wie beispielsweise die Zerstörung von Messinstrumenten, Mess- oder Auswertungsfehler, Wartung, ungeplante Totalausfälle, Schliessung und Neubau, welche Datenlücken in den Zeitreihen verursachen (Allen et al., 1998). Eine Vervollständigung der Datensätze durch geeignete Schätzverfahren ist unerlässlich um statistische Analysen durchzuführen oder um sie als Ausgangsdaten in hydrologischen Modellen einzusetzen.

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Zeitreihen ermöglicht eine Interpretation der hydrologischen Systemkomponenten, ihrer Prozesse und Veränderungen der hydrologischen Prozesse über die Zeit der Feldstudie hinaus. Oft können auch durch eine räumliche Einordnung und die Übertragung der Ergebnisse auf andere Gebiete (Regionalisierung) neue Erkenntnisse gewonnen werden (Blöschl et al., 2013). Durch den Vergleich verschiedener Einzugsgebiete können Änderungen von einzelnen Wasserhaushaltskomponenten in Funktion der Höhenlage, Geologie, Vegetation und weiteren Faktoren erkannt werden. Das Erfassen und das Studium von Parametern des Wasserkreislaufes in kleinen Ein-

zugsgebieten, ergänzt durch die Erfahrungen aus der Modellierung der Niederschlags-Abfluss-Prozesse, ermöglicht das hydrologische System grosser Gebiete mit anderen klimatischen Gegebenheiten besser zu verstehen (Lang et al., 1994).

In diesem Zusammenhang ist der Ansatz der vorliegenden Masterarbeit zu betrachten. Das hydrologische, konzeptionelle Modell (Schulze, 1998) namens HBV (Hydrologiska Byråns Vattenavdelning) konzipiert von Bergström (1973) wird auf sieben Einzugsgebiete im südlichen Alptal (SZ) angewendet, um deren Abflusszeitreihen zu vervollständigen und die hydrologische Dynamik in diesem Gebiet besser zu verstehen.

1.1 Stand der Forschung im Alptal

Das wissenschaftliche Ziel der Forschung im Alptal bestand ursprünglich in der Erkennung und Quantifizierung der hydrologischen Prozesse im Ökosystem Wald (Burch, 1994). 1963 begann der Forsthydrologe Hans M. Keller im südlichen Alptal ein umfangreiches hydrologisches Monitoring (Hegg et al., 2006), um den Einfluss des Waldes auf die Hochwasserbildung und die Wasserqualität zu untersuchen (Burch, 1994). Bei der Ausrüstung der hydrologischen Testgebiete im Alptal 1965 lag der Fokus zudem auf der Abhängigkeit und Sensibilität der verschiedenen Wasser- und Stoffbilanzkomponenten in Bezug auf Landnutzung, Klima und Geologie (Vischer, 1994). Zu diesem Zweck wurde an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) je ein Projekt zur Erfassung der Wasser- und der Stoffbilanz sowie ihrer Komponenten in kleinen bewaldeten Gebieten des Alptals initiiert. Ab 1967 rückten die Wasserqualität und der Einfluss der Bodennutzung auf die Quantität des abfließenden Wassers sowie dessen chemische Zusammensetzung ins Zentrum des Interesses (Keller, 1970a, 1970b; Keller et al., 1989). Der Ein- und Austrag von Wasser, deren Menge und Qualität sowie die zeitliche Verteilung sind bis heute die Hauptbestandteile der meisten Forschungsprojekte. Neben den klassischen hydrologischen Fragestellungen für Wildbach- und Waldgebiete erforschte man im südlichen Alptal Anliegen bezüglich Wasserverluste, Wasserspeicherung in Gebieten mit unterschiedlichem Wald-, Nassfläche-, und Weideanteil, Häufigkeit der Hochwasser und Geschiebetransport (Burch, 1994). Quantitative Probleme wurden auch Mitte der 70er Jahre noch untersucht, jedoch mit einem speziellen Fokus auf den Aspekt des Bodens (Richard und Germann, 1978). Des Weiteren interessierte sich die wissenschaftliche Forschung im Alptal für die Schneehydrologie und die chemischen Eigenschaften der Schneedecke und der Schneeschmelze (Waldner et al., 2004) um das Verständnis der saisonalen Veränderungen im Abfluss und der Wasserqualität besser zu vergrössern (Davies und Keller, 1983). Weitere wichtige Forschungsschwerpunkte der WSL waren die Erforschung von Naturgefahren und deren Analyse sowie verschiedene Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt (Keller et al., 1989; Feyen et al., 1996). Studien über Hochwasser (Burch et al., 1996a) und Geschiebetransport wurden initiiert, sowie Analysen bezüglich der Zerstörung durch Hochwasser (Forster und Hegg, 2000), Rutschungen und Felsstürzen (Schmid et al., 2004). Für die Datenerhebung wurden bis ins Jahr 1973 insgesamt elf Einzugsgebiete mit Messanlagen für klimatische und hydrologische Daten, wie beispielsweise Abfluss, Niederschlag, Geschiebetransport und Wasserqualität ausgerüstet. Seit dem zerstörerischen Hochwasser im Sommer 1974 werden nur noch drei Seitenbäche (Vogelbach, Lämpenenbach, Erlenbach) kontinuierlich untersucht und ihre Messstationen betrieben (Burch, 1994; Stähli und Badoux, 2015). Im Jahr 1986 wurde im Erlenbach zusätzlich ein hydrophon-basierter (später geophon-basierter) Geschiebesensor installiert (Bänziger und Burch, 1990) mit dem Ziel die Abfluss-Geschiebe Beziehung in Wildbächen besser zu verstehen (Hegg und Rickenmann, 1998, 2002). Zusammen mit dem Start der Untersuchungen über den Einfluss der Luftverschmutzung auf das Ökosystem Wald im

Jahre 1980 (Gassmann et al., 1991; Gehrig et al., 1991) wurde das Alptal immer mehr zum bestuntersuchten hydrologischen Testgebiet weltweit, in dem neben der WSL vermehrt auch Forschende anderer Institutionen, wie beispielsweise der Universität Zürich, Messungen durchführen (z.B. Fischer et al., 2015).

1.2 Zielsetzung

Die WSL untersucht seit über 100 Jahren die Hydrologie kleiner Einzugsgebiete (Hegg et al., 2006), von welchen das südliche Alptal seit 1963 ein Teil davon ist. Im Alptal wurden ebenfalls über längere Zeit hydro-meteorologische Daten erhoben, jedoch wurden nach der Zerstörung der installierten Messstationen im Jahre 1974 nur drei Stationen weiter betrieben, was zu unterschiedlich langen Messzeitreihen führte (Burch, 1994; Stähli und Badoux, 2015). Aus diesem Grund sind im Laufe der Jahre grosse Datenmengen und unterschiedlich lange Zeitreihen einzelner Systemkomponenten von sieben verschiedenen Einzugsgebieten entstanden.

Das Ziel der Masterarbeit besteht aus der Vervollständigung der lückenhaften Lufttemperatur-, Niederschlag- und Abflusszeitreihen der Einzugsgebiete Vogelbach, Lümpenenbach, Frifangbach, Gämschbach, Etterenbach, Erlenbach und Teufbach für den Zeitraum von 1968 bis 1984 anhand geeigneter Schätzverfahren und der Modellierung mit dem HBV-Modell. Ausserdem geht es um die Analyse dieser Zeitreihen mit dem Bestreben mehr Informationen über die klimatischen und hydrologischen Verhältnisse im Alptal zu gewinnen. Des Weiteren werden die originalen und komplettierten Zeitreihen der sieben Einzugsgebiete verglichen um ein besseres Verständnis der hydrologischen Systemkomponenten und ihrer Prozesse im Wasserkreislauf sowie ihre Veränderungen im Laufe der Zeit zu erlangen.

Hypothesen, welche im Zusammenhang mit der Zielsetzung interessieren, sind:

- Die Lufttemperatur, die Niederschlags- und Abflussmenge erhöhten sich während der Untersuchungsperiode aufgrund klimatischer Veränderungen.
- Die Ursache für das unterschiedliche Abflussverhalten der Einzugsgebiete liegt am unterschiedlichen Untergrund und an der Landnutzung.
- Die Unterschiede der Parameterausprägungen des HBV-Modells widerspiegeln die klimatischen und physiographischen Eigenschaften der einzelnen Einzugsgebiete.
- Eine Regionalisierung der Gesetzmässigkeiten des hydrologischen Systems im südlichen Alptal und deren Daten ist möglich.

1.3 Gliederung der Masterarbeit

Nachdem im Kapitel 1 auf die Fragestellung und die Ziele dieser Arbeit eingegangen wurde, gibt das Kapitel 2 einen kurzen Überblick über den Forschungsstandort Alptal und dessen Geschichte. Ausserdem wird auf den Forschungsstand sowie die sieben Teileinzugsgebiete im südlichen Alptal eingegangen.

Das Kapitel 3 befasst sich mit den Datensätzen und deren Überprüfung auf die Qualität. Des Weiteren wird die Vorgehensweise der Datenkorrektur sowie die Inter- und Extrapolation der lückenhaften Zeitreihen erklärt. Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Kapitel sind die Grundlagen des HBV-Modells,

die Vorgehensweise der Kalibrierung, die Wahl der Modellstruktur und der Grenzwerte der Inputparameter.

Anschliessend folgen im Kapitel 4 die ersten Vergleiche der Einzugsgebiete anhand der korrigierten Datensätze der Lufttemperatur-, Niederschlag- und Abflussdaten. Als nächstes folgt der Gebietsvergleich der vervollständigten Zeitserien der Temperatur und Niederschlagsdaten. Im letzten Teil werden die modellierten Abflussdaten, ihre Modellgüte sowie die unterschiedlichen Parameterausprägungen der untersuchten Einzugsgebiete behandelt.

Das Kapitel 5 fasst die wichtigsten Resultate zusammen und gibt mögliche Erklärungen für die unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete.

Das Kapitel 6 dient der abschliessenden Betrachtung der Ergebnisse und enthält einen Ausblick über den Forschungsgehalt der vorliegenden Arbeit.

2. Forschungsgebiet – Alptal

Die Entwicklung des Alptals zu einem Forschungsstandort geht bis ins Jahr 1885 zurück, als aufgrund der übernutzten Wälder und einer Vielzahl von starken Hochwasser in der Schweiz, die Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen entschied den Einfluss des Waldes auf Hochwasser zu untersuchen. Als Geburtsstunde der hydrologischen Forschung der WSL gilt der 8. April 1903 (Hegg et al., 2006). Damals wurde mit kontinuierlichen Messungen von Abflüssen zwei kleiner und unterschiedlich bewaldeten Einzugsgebieten im Berner Emmental (Sperbelgraben und Rappengraben) begonnen. Die Hauptuntersuchung galt dem Einfluss des Waldes auf das Abflussverhalten in unterschiedlichen Einzugsgebieten. Die Resultate dieser bedeutenden und eindrücklichen Untersuchungen prägten das forsthydrologische Denken über Jahrzehnte (Burch et al., 1996a). Nach einer Intensivierung der forsthydrologischen Forschungsarbeiten in anderen Gebiete, startet 1963 Hans M. Keller mit der Wasserbilanzforschung im Alptal (Burch, 1994). Weitere Informationen über die Entwicklung des Forschungsstandorts Alptal befinden sich in Burch (1994) und Hegg et al. (2006) sowie im Anhang A.

2.2 Untersuchungsgebiet Alptal

Das Alptal ist das von der Alp durchflossene Tal im Kanton Schwyz mit einer Gesamtfläche von 46.8 km² (Abb. 1) (Swisstopo, 2014). Es liegt zirka 40 km südöstlich von Zürich in den zentralen Voralpen und hat eine mittlere geographische Koordinate von (697078/213640) (CH1903) (Swisstopo, 2015; Keller, 1970a, 1970b). Die Talsohle des ungefähr 15 km langen und durchschnittlich 3 bis 4 km breiten Tales steigt sanft von 900 auf etwa 1100 m ü. M. an (Tab. 1) (Forster und Hegg, 2000; Swisstopo, 2014). Das Einzugsgebiet der Alp erstreckt sich in Nordsüdrichtung zwischen den Mythen und Einsiedeln (Keller, 1970a, 1970b). Während das Alptal im Westen und Osten durch je eine Hügelkette von etwa 1500 m ü. M. begrenzt wird, bilden im Süden und Südwesten der Grosse und der Kleine Mythen eine Barriere und im Norden gegen Einsiedeln hin ist das Tal offen (Burch, 1994). Die Alp gehört zum Flussgebiet der Limmat und hat eine Länge von 16.4 km (BAFU, 2012).

Tabelle 1: Kennwerte des Einzugsgebiets der Alp (BAFU, 2012; Swisstopo, 2014).

Bezeichnung	Wert
Mittlere Einzugsgebietshöhe [m ü. M.]	1151.5
Höchster Punkt [m ü. M.]	1896.5
Tiefster Punkt [m ü. M.]	837.5
Höhe des Quellgebiets [m ü. M.]	1510
Flussdichte [km km ⁻²]	0.78
Mittleres Gefälle des Hauptgerinnes [m km ⁻¹]	40.8
Durchschnittliche Hangneigung [%]	34.8

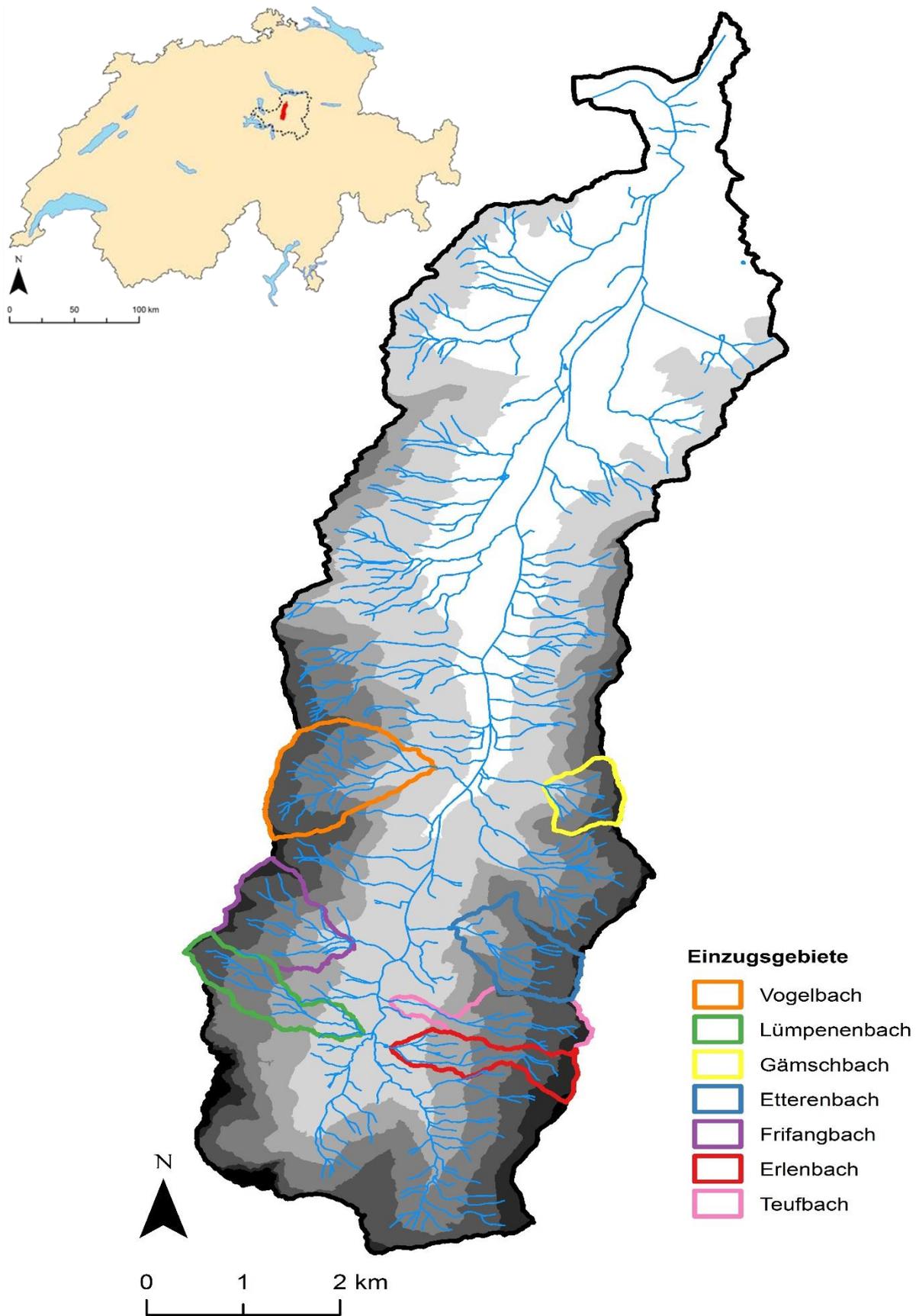


Abbildung 1: Übersichtskarte des Alptals mit den sieben untersuchten Einzugsgebieten, dem Gewässernetz und eingezeichnete Höhenstufen.

2.2.1 Geologie

Das Einzugsgebiet Alptal ist durch die Flyschzone geprägt, welche aus wasserstauenden Schichten aufgebaut ist und somit ein rasches Einsickern von Niederschlägen verhindern und starken Oberflächenabfluss verursachen (Scholz, 1995). Aus dem oberflächlich abfliessenden Wasser entstanden zahlreiche Tobel und Hänge. Der geologische Untergrund in Verbindung mit Niederschlägen ist für eine ausgeprägte Mikrotopologie und eine räumlich variable Entwicklung von Bodentypen verantwortlich, welche komplexe Abflussbildungsprozesse verursachen (Rinderer et al., 2014).

Der nördliche Teil des Einzugsgebiets liegt in der subalpinen Molasse (BAFU, 2012). Im Süden besteht das Muttergestein hauptsächlich aus Formationen des alttertiären und erosionsanfälligen Wägitaler Flysches, welcher eine geringe Wasserdurchlässigkeit aufweist (Hantke et al., 1967). Die unregelmässige Schichtung im Wägitaler Flysch wechselt zwischen Kalk- und Kalksandstein einerseits sowie Ton- und Mergelschiefer andererseits (Frei, 1963; Keller, 1970a, 1990). Die letzteren weisen eine Mächtigkeit von Zentimeter bis Dezimeter auf, während die Kalk- und Kalksandsteine eine Mächtigkeit von Dezimeter bis Metern aufweisen können (Frei, 1963). Obwohl der Volumenanteil dieser Schiefer bei Weitem nicht die Hälfte erreicht, sind diese neben der subalpinen Molasse massgebend dafür verantwortlich, dass der geologische Untergrund des Einzugsgebiets der Alp eine mittel bis sehr geringe Wasserdurchlässigkeit aufweist (Tab. 2) (Jäckli, 1967; Keller, 1990; BAFU, 2012). Zusätzlich wird der Untergrund durch verschiedene Flyschschuppen und aus Kalken bestehenden Klippen der Mythen durchdrungen. In diesem Bereich ist die Wasserscheide nicht genau festzulegen, da aufgrund der Verkarstung die Abflussrichtung des versickerten Wassers nicht unbedingt mit derjenigen des Oberflächenwassers übereinstimmt. Diese Zone erhöhter Durchlässigkeit hat jedoch flächenmässig einen geringen Anteil am Einzugsgebiet. Ebenfalls gering ist der Anteil der vorhandenen Moränenresten in denen auch uneinheitliche Wasserdurchlässigkeiten auftreten (Keller, 1970b). Das Alptalgebiet mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 35 % und einem Maximum von 64 % ist durch ein dichtes Entwässerungsnetz ausgezeichnet, in welchem nur die grossen Bäche tiefer in das Gelände eingeschnitten sind (Rinderer et al., 2014). Die erheblichen Hangneigungen führen oftmals zu oberflächlichen Rutschungen (Frei, 1963), wobei über 60 % der aktiven Rutschungszonen in der Nähe der Gerinne zu finden sind (Holliger, 1984). Der Grundwasserträger im Tal bildet ausserdem ein Alluvialboden (BAFU, 2012).

Tabelle 2: Geologie im Alptal (BAFU, 2012).

Lockergesteine	[%]
Durchlässigkeit variabel	25.0
Durchlässigkeit mittel – gross	11.2
Durchlässigkeit klein	1.1
Festgesteine	[%]
Wasserstauer z.T. mit Klüften	10.0
Sedimentgesteine mit Klüften	49.9
Gesteine mit Tendenz zur Verkarstung	2.8

2.2.2 Pedologie

Die Verwitterung der Flysch-Formationen resultiert in schwere und dichte Böden mit geringer Wasserdurchlässigkeit (Tab. 3) (Burch et al., 1996a). Der heute meist mehrstufige Wald stockt auf mehrheitlich stark tonhaltigen und hydromorphen Böden von geringer Mächtigkeit (Keller, 1990). Stellenweise kommen podsolierte Braunerden vor, die an steilen Hängen tiefgründig und relativ gut durchlässig sind (Tab 3) (Holliger, 1984). Die Alptaler Böden sind jedoch grundsätzlich reich an Schluff und Ton und führen oftmals zu Arten des Gley mit unterschiedlich mächtiger Oxidationszone (Keller et al., 1989; Burch, 1994). Je nach Vernässungsgrad variiert die Humusform des Oberbodens von Rohhumus bis Anmoor (Burch, 1994). Ausserdem sind die Flyschböden unvollständig drainiert. Auf flachem und höher gelegenen Grund zeigt sich unter den relativ mächtigen Humushorizonten mit 10 bis 50 cm Mächtigkeit häufig Grund- bzw. Hangwasserstau (Holliger, 1984; Burch, 1994). Ein Zeichen für stark gehemmte Durchlässigkeit des fein strukturierten Mineralhorizontes und somit physiologischer Flachgründigkeit (Keller, 1970b). Die Wasserspeichervermögen des Bodens ist mit einem mittleren Wasserspeichervermögen von 54.1 mm gering (BAFU, 2012) und führt zu häufigen Hochwasserabflüssen nach intensiven Regenfällen (Keller, 1970b). Trotz der geologischen Ähnlichkeit im gesamten Alptal können die Bodenwasserverhältnisse insbesondere zwischen Mulden- und Kuppenlagen auf engem Raum stark variieren (Burch et al., 1996a).

Tabelle 3: Eigenschaften der Alptaler Böden in % der gesamten Fläche (BAFU, 2012).

Bodentyp	[%]	Wasserdurchlässigkeit	[%]
Regosol	47.6	stark gehemmt	20.8
Gleysol	20.8	gehemmt	37.4
Cambisol	27.5	schwach gehemmt	36.3
undefinierter Bodentyp	4.1	normal	1.4

Wasserspeichervermögen	[%]
gering	47.6
mässig	22.7
gut	21.6
sehr gut	4.0

2.2.3 Vegetation und Landbeschaffenheit

Wald ist die vorherrschende Vegetationsform in den steilen Hängen der meist tief eingeschnittenen Bachsohlen des Alptals. Es handelt sich um einen extensiv genutzten, mehrstufigen, subalpinen Fichtenwald mit 10 bis 15 % Weisstannenanteil in Schattenlagen (Keller, 1970b; Holliger, 1984; Burch et al., 1996a). Zusätzlich weisen die Bestände einen Laubholzanteil (Buchen, Weissertlen, Ahorn) von ungefähr 15 % auf in den Höhen bis 1200 m ü. M. (Burch, 1994). Bis in die 1970er Jahre waren die Waldflächen ungenügend erschlossen und eine intensive Bewirtschaftung war nur beschränkt möglich (Keller, 1970b). Heute wird der Wald nachhaltig bewirtschaftet und der Kahlschlag ist verboten (Keller, 1970a).

Etwa 50 % des Einzugsgebiets der Alp ist montane oder subalpine Vegetation (Tab. 4). Des Weiteren treten im Nichtwaldgebiet hauptsächlich Weiden und Feuchtgebiete (meist Kalk-Flachmoore) auf (Holliger, 1984; Keller et al., 1989, Burch et al., 1996a). Die landwirtschaftliche Landnutzung konzentriert sich vor allem auf die Weidehaltung von Vieh nahe der Talsohle oder als Alpweiden in flacheren Gebieten um die Bergkämme. Viele der Weideflächen sind durch den Tritt oberflächlich verdichtet und zeigen die für die Flyschweiden typischen horizontalen Viehpfade, welche sich durch kleine eingetiefte Bachgräben in Fallrichtung und kleinflächige Sackungen auszeichnen (Keller, 1970a; Holliger, 1984). Der Nutzungsgrad der Landwirtschaft wird als durchschnittlich für eine voralpine Region bezeichnet (Burch, 1994)

Sumpfwiesen, Hang- und Flachmoore kommen im Alptal häufig vor und befinden sich auf flachen Partien, wo sich natürlicherweise kein Wald einstellt und eine Beweidung aus ökologischen Gründen nicht möglich ist (Tab. 4) (Keller, 1970b; Holliger 1984). An gewissen Orten sind künstliche offene Entwässerungsgräben angelegt worden um die Hangstabilität und die Möglichkeit der natürlichen Regeneration des lokalen Waldes zu gewährleisten (Keller, 1990). Die Feuchtgebiete dienten früher teilweise der Streunutzung, jedoch werden die meisten Mooregebiete schon seit den 1970er Jahren nicht mehr für die Ernte von Stroh genutzt (Keller, 1970a). Diese Moorflächen weisen Böden mit mächtigen Humushorizonten auf und der Wasserspiegel steht das ganze Jahr hindurch nahe der Oberfläche (Keller, 1970b; Holliger 1984). Immer häufiger werden die Feuchtgebiete durch Drainagekanäle entwässert und weidefähig gemacht (Holliger, 1984). Die Rohhumusaufgabe kann eine Mächtigkeit von bis zu einem Meter betragen, die darunterliegenden Mineralhorizonte sind meist graublau gefärbt und zeugen von permanenter Wassersättigung (Keller, 1970b).

Tabelle 4: Landnutzung und Waldzusammensetzung (BFS, 1992, 1997).

Bezeichnung	Fläche [%]
Geschlossener Wald	48.20
- Nadelwald	30.61
- Nadelmischwald	10.87
- Laubmischwald	5.08
- Laubwald	1.67
Aufgelöster Wald	1.25
Wies- und Ackerland	24.56
Heimweiden und verbuschte Wiesen	8.50
Maiensässe, Heualp, Bergwiesen	0.10
Alp- und Juraweiden	10.26
Unproduktive Vegetation	2.04
Fels, Sand, Geröll	0.44
Gebäudeareal	3.52
Industrieareal	0.55
Erholungs- und Grünanlagen	0.12
Besondere Siedlungsflächen	0.38
Verkehrsflächen	0.08
Vergletscherung	0.00

Landnutzungsänderungen gehen langsam voran und konzentrieren sich in den meisten Fällen auf die Verbesserung von Weidegebieten auf Trockenfirsten und auf das zugänglich machen von Waldstücken, während alle Nassflächen und wenig fruchtbare Gebiete unbenutzt bleiben (Keller et al., 1989). Die grössten Nutzungsänderungen stellen der sich vergrössernde Waldanteil durch künstliche und natürliche Aufforstung sowie die Entnutzung der Streuwiesen in den 1960er Jahre dar (Burch et al., 1996b). Ausserdem wurde der Winter- und Wandersportort Brunni immer mehr mit Skiliften und Pisten versehen, welche die Umgebung im südlichen Alptal prägen (Brunni Alpthal, 2015).

2.2.4 Klima

Das Klima im Alptaler Einzugsgebiet ist kühl und feucht. Die Voralpen des Alpennordhanges sind den Nordwestwinden offen ausgesetzt und somit sammelt sich in diesem von Nord nach Süd ausgerichteten Tal Niederschlag (Keller et al., 1989). Die jährliche Niederschlagsmenge im Alptal beträgt durchschnittlich 2180 mm a^{-1} und liegt damit deutlich über dem Schweizer Durchschnitt von 1450 mm a^{-1} (Schädler und Weingartner, 2002a).

Durch die Kessellage des Alptals nimmt die Summe der Jahresniederschläge von Norden nach Süden zu, so liegt der durchschnittliche Jahresniederschlag in Einsiedeln bei 1650 mm a^{-1} , im Vogelbachgebiet bei 2150 mm a^{-1} und im Lümpenenbachgebiet bei 2200 mm a^{-1} . Die saisonale Verteilung der Niederschläge zeigt ein leichtes Maximum in den Sommermonaten (Burch, 1994), so entfallen rund 60 % des Niederschlags auf das Sommerhalbjahr (April bis September) und 40 % auf das Winterhalbjahr (Oktober bis März) (Keller, 1970b; Holliger, 1984). Die vielen Niederschlagsereignisse führen oft zu mittleren bis grossen Hochwasserereignissen über das ganze Jahr hinweg (Burch, 1994). Im Sommer können intensive Gewitter kurze aber ausgeprägte Spitzen im Abfluss mit erhöhten Raten von gelösten Sedimenten und im Geschiebetransport erreichen (Keller et al., 1989, Keller, 1990). Im Winter fallen 30 % der jährlichen Niederschlagssumme in Form von Schnee (Stähli und Gustafsson, 2006). Während den Wintermonaten sind es sogar 70 % der anfallenden 800 mm a^{-1} grossen Niederschlagssumme (Keller, 1970a).

Der Beginn der Schneeschmelze im Gebiet der Alp liegt im Mittel zwischen Mitte und Ende März und dauert bis in die ersten Maiwochen hinein. Während dieser Zeit führen die Seitenbäche der Alp nicht nur Wassermengen bedingt durch den Frühjahrsregen, sondern zusätzlich das Schmelzwasser der sich abbauenden Schneedecke. Die Niederschlagsmengen der Monate April und Mai entsprechen 15 % der Jahresniederschläge und durch das zusätzliche Schmelzwasser (25 % des Jahresniederschlags) fliesst somit zirka 40 % der jährlichen Wassermenge ab. Der grösste durchschnittliche Monatsabfluss weist der Monat Mai auf mit 9.5 mm d^{-1} . Während des ganzen Sommers und Herbstes sind die Abflussmengen mit Ausnahme gelegentlicher Schneefälle hauptsächlich regenbedingt und darum um einiges geringer als in den Frühlingsmonaten. Erst während den herbstlichen Trockenperioden treten Niederschlag auf (Keller, 1970b). Kontinuierliche Perioden mit geringem Abfluss sind im Alptal aber eher selten zu beobachten (Keller et al., 1989). Wenn mit dem Einschneien im November und der Ausaperung Ende April gerechnet wird, herrschen im Alptal während etwa sechs Monaten winterliche Bedingungen. Die Bäche führen während dieser Zeit mit Ausnahme gelegentlicher Schmelztage Niedrigwasser bis Ende März, mit den niedrigsten Abflüssen im Januar mit 1.5 mm d^{-1} (Keller, 1970b). Der Wasserhaushalt der Alp ist dem Regimetype nivo-pluvial préalpin zuzuordnen (BAFU, 2012).

Da sich alle Versuchsgebiete über 1000 m ü. M. befinden, sind sowohl Wasser- sowie Lufttemperaturen eher niedrig. Während sechs Monaten (November bis April) kann die Wassertemperatur im Monatsmittel durchwegs über derjenigen der Lufttemperatur liegen. Nur während den Monaten Mai bis Oktober ist das Wasser kühler als die Luft (Keller, 1970b). Die Jahresmitteltemperatur beträgt ungefähr 5 °C (Hinz, 2004) mit einem Maximum von 14 °C im Juli und einem Minimum von 3 °C im Januar (Walthert et al., 2003). Diese Temperatur- und Feuchteverhältnisse führen im südlichen Alptal zu einer aktuellen Verdunstung von etwa 400 mm a⁻¹ (Menzel et al., 1999).

2.3 Die untersuchten Teileinzugsgebiete

Bei der Auswahl der Teileinzugsgebiete für die Forschung im Alptal wurde darauf geachtet, die Umweltfaktoren Geologie und Klima nach Möglichkeit konstant zu halten, um gewisse hydrologische Prozesse besser vergleichen zu können. In der südlichen Hälfte des Alptals wurden auf engem Raum mehrere kleine Einzugsgebiete ermittelt, welche diesen Anforderungen gerecht wurden (Tab. 5) (Keller, 1970b). Die relative Ähnlichkeit der Witterung und der Böden im ganzen Tal sowie die unterschiedliche Vegetationszusammensetzung und Bodennutzung in den Einzugsgebieten sind der Anlass, in diesem Gebiet der Zentralschweiz vergleichende hydrologische und geomorphologische Studien durchzuführen (Burch, 1994). Ausserdem ist das südliche Alptal durch die Lage in den nördlichen Voralpen gut vor mittelländischen Immissionen geschützt und liegt dennoch in praktischer Reichweite von Birmensdorf (Hauptsitz der WSL) und ist somit für die aufwendige und zeitintensive Datenerhebung schnell und ganzjährig erreichbar. Nicht zuletzt hat auch die wohlwollende Unterstützung der lokalen Behörden, der Grundeigentümer und des Forstdienstes die Wahl des Standortes Alptal stark begünstigt (Burch, 1994).

Tabelle 5: Übersicht über die Eigenschaften der sieben untersuchten Einzugsgebiete im südlichen Alptal: N/A (Nicht in der Literatur vorhanden). Flächen-, Höhen-, Distanz- und Expositionsdaten aus dem DHM berechnet (Swisstopo, 2014). Weitere Angaben aus Keller (1970a), Holliger (1984), Burch (1994) und Burch et al. (1996a).

	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
Fläche [km²]	1.56	0.88	1.14	0.54	0.97	0.73	0.92
Ø Einzugsgebietshöhe [m ü. M.]	1342	1318	1371	1360	1363	1348	1368
Waldanteil [%]	63	19	38	83	60	39	38
Weideanteil [%]	12	57	42	11	0	0	0
Nassflächenanteil [%]	25	24	20	6	40	61	62
Mittlere Neigung [%]	42	28	39	65	37	29	30
Mittlere Gerinneneigung [%]	22	N/A	29	46	23	17	N/A
Exposition	OSO	OSO	O	WNW	WNW	W	WSW
Tiefster Punkt [m ü. M.]	1046	1097	1112	1115	1102	1112	1082
Höchster Punkt [m ü. M.]	1551	1521	1565	1559	1523	1655	1553
Entwässerungsdichte [km km⁻²]	6.3	6.7	5.5	5.7	5.5	6.3	5.0
Flie遨strecke [km]	9.8	5.9	6.3	3.1	5.3	4.6	4.6
Niederschlagssumme [mm a⁻¹]	2170	2290	N/A	2055	N/A	2190	N/A
Abflusssumme [mm a⁻¹]	1630	1990	N/A	1103	N/A	1470	N/A
Verdunstungssumme [mm a⁻¹]	540	300	N/A	N/A	N/A	450	N/A

Die Einzugsgebiete der verschiedenen Bäche liegen zwischen 1046 und 1655 m ü. M. (Tab. 5) in einer mittleren geographischen Breite von 47°04' Nord und einer Länge von 8°43' Ost (Keller, 1970a). Die Bäche im südlichen Alptal sind Wildbäche mit stark schwankender Wasserführung. Die Berechnungen der Entwässerungsdichte der EAFV zeigten innerhalb der Einzugsgebiete keine grossen Unterschiede, deuteten aber mit Werten über 5 km km⁻² auf eine rasche Konzentration des Oberflächenwassers bei Hochwasser hin. Die konstanten Werte der Entwässerungsdichte geben einen Hinweis auf die Homogenität der Gebiete bezüglich Geologie und Klima (Holliger, 1984). Jedoch variieren sie in Neigung, Exposition, Grösse, Gestalt und Umgebung (Tab. 5).

Der Vogelbach ist einer der sieben untersuchten Nebenflüsse der Alp im südlichen Alptal. Im Vogelbach wird durch das WSL Abfluss, Sedimentgeschiebe, Wasserchemie und hydro-meteorologische Daten seit 1968 kontinuierlich gemessen (Milzow et al., 2006). Das Einzugsgebiet liegt im Flysch-Grundgestein und wird von kalkhaltigen Sandsteinen sowie Tonschiefern und bentonitischen Talkschiefern dominiert. Im Vogelbachgebiet sind schwere, tonreiche Braunerden zu finden, welche zum Teil tiefgründig, skeletthaltig und relativ gut durchlässig sind (Burch, 1994; Burch et al., 1996b). Die hohen Anteile an Ton führen meist zu kleinen Infiltrationsraten im Gebiet. Somit ist die Abflussreaktion auf den Regen gross aufgrund der geringen Perkolationsrate in den Boden, den steilen Hängen und einem gut entwickelten Ablauf-Netzwerk (Milzow et al., 2006). Trotz des steilen Gradienten sind die dominanten morphologischen Eigenschaften des Bachlaufes Stufen und Becken. Das Flussbett beinhaltet eine heterogene Mischung von Sedimenten (Kies bis Geröll), mit wenigen kurzen und verwitterten Grundgesteinsausbrüchen (Milzow et al., 2006).

Die Böden im Lämpenenbachgebiet sind mehrheitlich tiefgründiger und durchlässiger, jedoch etwas weniger tonreich und skeletthaltig als im Vogelbachgebiet (Burch et al., 1996b). Im südlichen Alptal wird nebst der Streunutzung lediglich im Einzugsgebiet des Lämpenenbachs noch landwirtschaftliche Bewirtschaftung betrieben (Burch, 1994). Selbst in den oberen Hanglagen musste der Wald der Landwirtschaft weichen. Jedoch ist das Bachbett trotz Viehwirtschaft vollständig von Bäumen als sogenannter Galeriewald umgeben. Im Winter ist ein grosser Teil des Lämpenenbachgebiets mit Skipisten bedeckt, wobei der untere Teil beschneit wird (Holliger, 1984).

Das Einzugsgebiet des Gämschbaches ist das am schlechtesten erschlossene Gebiet im Alptal. Der obere Teil ist von relativ dichtem Wald bestockt, der im unteren Teil in bewirtschaftetes Weideland übergeht. Aber auch in diesem Gebiet ist der Bach von Bäumen gesäumt (Keller, 1970a; Holliger, 1984). Das Einzugsgebiet des Erlenbachs wird von einem recht offenen Wald und stark vernässten Böden dominiert (Holliger, 1984). Der extensiv genutzte, mehrstufige Fichtenwald mit 10-15 % Weisstannenanteil stockt auf tonreichen, gehemmt durchlässigen, zum Teil sauren Hanggleyböden mit unterschiedlich mächtiger Oxidationszone (Burch et al., 1996b). Das Einzugsgebiet liegt voll umfänglich in Flysch, welcher wasserundurchlässige und rutschanfällige Böden (Gleysole) bildet, wodurch sich ein grosser Teil der Böschung des Erlenbachs in einem instabilen Zustand befindet (Hegg und Rickenmann, 2002). Das Gebiet ist insgesamt forstwirtschaftlich gut erschlossen. Während der Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 wurde das forstliche Wegnetz, wie im Lämpenen- und Vogelbachgebiet, immer mehr durch asphaltierte Strassen ausgebaut (Burch, 1994). Die extensive Beweidung des gesamten Erlenbachgebiets fand 1976 ein Ende, mit Ausnahme einer Weide von rund 10 ha an der oberen Einzugsgebietsgrenze (Burch et al., 1996b). Der bescheidene Erfolg der systematischen Aufforstung war der Anlass, das Gebiet nach und nach der Naturverjüngung zu überlassen (Burch, 1994). Das Bachbett des Erlenbachs zeigt wie das Vogelbachgebiet eine ausgeprägte Stufen-Becken Morphologie, wobei in den Stufen aus Holz, viel Schutt und Sediment abgelagert wird (Hegg und Rickenmann, 1998).

Für die Einzugsgebiete des Frifang-, Etteren- und Teufbachs konnten in der Literatur keine weiteren Angaben zur Landnutzung und dem Untergrund ermittelt werden.

2.4 Alptaler Messnetz

Die Abflussmessungen sind das Herzstück der hydrologischen Forschung im südlichen Alptal, mit dem Ziel Basisinformationen in einem Langzeituntersuchungsprogramm zu sammeln (Abb. 2) (Keller, 1988). Die Anstrengungen der WSL-Mitarbeitenden in den letzten 50 Jahren waren entsprechend gross, qualitativ hochwertige und möglichst lückenlose Abflusszeitreihen in den verschiedenen Wildbächen zu generieren (Stähli und Badoux, 2015). Die ersten Messungen begannen im Jahr 1967 mit diskontinuierlichen (wöchentlich), aber häufigen Durchflussmessungen und Probenahmen für die Wasserqualität (Keller, 1970a). Im Jahre 1968 wurden zwei von elf Einzugsgebieten zwischen der Ortschaft Alpthal und dem Wintersportort Brunni mit einem Niederschlagsmesser und einer Messstation zur kontinuierlichen Abflussmessung ausgestattet. Dies war der Start einer expandierenden Überwachungstätigkeit im Alptal. Trotz den geringen finanziellen sowie personellen Mitteln konnten bis 1973 in jedem der elf Gebiete Abflussmessstationen in Betrieb genommen werden (Abb. 2) (Keller, 1990). Nebst den Bauarbeiten an den neuen Stationen mussten auch die Unterhaltsarbeiten an den bestehenden Stationen sowie der Winterbetrieb sichergestellt werden. Die Probenahme von Bach- und Niederschlagswasser sowie Eichmessungen an den Abflussmessstationen für die Nachführung der Eichkurven vervollständigten die zeitintensive Arbeit im Feld (Burch, 1994).

Aufgrund der grossen Anzahl der Stationen und dem begrenzten Budget waren die Konstruktionen oftmals von temporärem Charakter und somit nur für niedrigen und mittleren Abfluss dimensioniert. Ein starkes Hochwasser am 23.06.74 beschädigte oder zerstörte alle elf Abflussmessstationen (Hegg et al., 2006; Stähli und Badoux, 2015). Nach einer ersten Sichtung der damals vorliegenden Daten entschloss man sich von den ehemals elf Gebieten deren drei (Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach) wieder in Betrieb zu nehmen und in permanente Messeinrichtungen zu investieren. Ein Sommer nach dem grossen Hochwasser konnte der Betrieb am Vogel- und Lümpenenbach wieder aufgenommen werden, während im Erlenbach erst 1978 mit den kontinuierlichen Messungen begonnen werden konnte (Keller, 1990; Forstliche Hydrologie, 1993).



Abbildung 2: Ursprüngliche Abflussstation im Vogelbachgebiet von 1968 – 1974 (a) und neue Abflussmessstation im Erlenbachgebiet seit 1978 (b).

Die permanenten Abflussmessstationen wurden mit Niedrigwasserrinnen und hochwassertauglichen Durchlässen ausgestattet, deren Messprinzip dem üblichen Standard entspricht. Das Wasser wird dafür in möglichst ruhigem Fluss durch einen offenen Kanal mit bekanntem Querschnitt geleitet und der Wasserpegel wird kontinuierlich durch eine automatische Pegelerfassung aufgezeichnet; früher mit einem mechanischen Pegelschreiber oder Schwimmersystemen, heute mit einer Drucksonde. Als ge-

gegenseitige Kontrolle der Abflussmessungen im Erlenbachgebiet dienen die Messungen ober- und unterhalb des Geschiebebeckens bei der Station Erlenbach. Zudem führen die massiven Holzurückhalte- und Wasserberuhigungsvorrichtungen am unteren Ende des Geschiebesammlers zu plausiblen Abflussmessungen im Hochwasserfall (Stähli und Badoux, 2015). Bei Hochwasser ab einem vorgegebenen Wasserstand wird ausserdem automatisch eine Salzverdünnungsmessung durchgeführt, um auch Messpunkte im Hochwasserbereich zu erhalten. Diese Messdaten werden neben periodischen Abflussmessungen durch die Salzverdünnungsmethode und Resultaten aus hydraulischen Laborversuchen für die Kalibrierung der Eichkurve verwendet (Burch und Fritschi, 1994).

In der untenstehenden Tabelle 6 werden die genauen Höhenlagen der Abflussmessstationen angezeigt, wobei ersichtlich ist, dass die Stationen alle ungefähr auf demselben Höhenniveau liegen. Da keine Höhenangaben zu den Messstationen der Lufttemperatur gefunden wurden, wurde davon ausgegangen, dass die Temperatur der Einzugsgebiete bei den jeweiligen Abflussmessstationen gemessen wurde.

Tabelle 6: Übersicht über die Messhöhen der Abflussmessstation der untersuchten Einzugsgebiete (Swisstopo, 2014).

Einzugsgebiet	Abflusshöhe [m ü. M.]
VOG	1046
LUM	1097
FRI	1112
GAM	1115
ETT	1102
ERL	1112
TFB	1082

Neben den Abflussmessstationen wurden noch weitere Messvorrichtungen installiert um hydrologische und klimatologische Parameter im südlichen Alptal zu messen. Einerseits erfasst die Klimastation Erlenhöhe aus dem Jahr 1981, die Parameter Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windweg Nord/Süd, Windweg Ost/West, Windspitze, Niederschlagsmessungen mit Wippe, Waage und Totalisator, Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und Helligkeit (Burch, 1994). Andererseits umfasst das Niederschlagsmessnetz zwei Totalisatoren auf unterschiedlichen Höhenstufen, eine Waage und ein bis zwei Wippen pro untersuchtes Einzugsgebiet. Die Totalisatoren auf dem Höhenniveau A liegen zwischen 1410 und 1470 m ü. M. und diejenigen auf dem Niveau B zwischen 1150 und 1260 m ü. M. (Tab. 7). Für die Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes sind seit 1970 zwei Grundwasserpegel im oberen Teil des Vogelbachgebiets installiert. Seit 1972 existiert ausserdem ein Schneemessnetz (Burch und Fritschi, 1994).

Tabelle 7: Übersicht über die Niederschlagsmessstationen und ihre Eigenschaften in Bezug auf Distanz, Höhe und Exposition (WSL, 2001; Swisstopo, 2014).

Station	Distanz zu Einsiedeln [m]	Höhe [m ü. M.]	Exposition
VOG A	7073	1420	OSO
VOG B	6047	1150	OSO
LUM A	9108	1430	OSO
LUM B	9175	1210	S
FRI B	8519	1260	O
BUZ B	7081	1220	WNW
GAM A	6286	1470	WNW
GAM B	6256	1180	WNW
ETT A	8455	1410	WNW
ETT B	8703	1150	WNW
ZWA A	11100	1440	NW
ZWA B	10300	1170	NW
ERL A	9336	1420	WNW
ERL B	9739	1220	WNW

Während der letzten Jahre wurden immer weitere Parameter ins Beobachtungsprogramm aufgenommen. Aus diesem Grund hat sich die Intensität des Messnetzes verbessert, aber es haben auch erhebliche Kürzungen in Bezug auf die Anzahl der untersuchten EZG stattgefunden (Keller, 1990). So sind im Laufe der Zeit von 1968 bis 1984 insgesamt 11 Einzugsgebiete des Alptals mit verschiedener natürlicher Ausstattung während unterschiedlicher Zeitperioden in die Untersuchungen mit einbezogen worden (Keller, 1990; Forstliche Hydrologie, 1993). Das eigentliche Kapital des Messnetzes bilden die zum Schluss bereinigten meteorologischen und hydrologischen Daten (Burch, 1994).

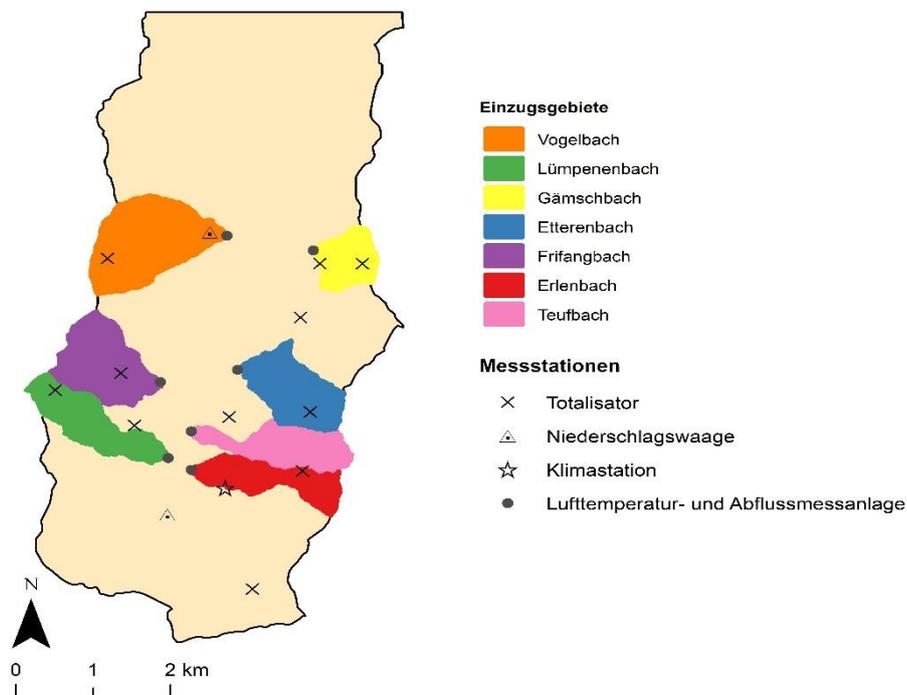


Abbildung 3: Übersicht über die untersuchten Einzugsgebiete und den Messstationen im südlichen Alptal.

3. Methoden

In diesem Teil wird auf die Datengrundlage, ihre Korrektur und die Überprüfung der Datenqualität eingegangen. Ausserdem handelt es von der Ergänzung der fehlenden Daten durch Inter- und Extrapolation und der Verwendung des HBV-Modells für die Modellierung der Abflussdaten. Im Folgenden werden das methodische Vorgehen und die verwendeten Methoden erläutert und näher erklärt.

3.1 Originale Daten, ihre Korrektur und Qualität

Alle Datensätze waren aus dem hydrologischen Archiv der WSL in Birmensdorf, mit Ausnahme der Klimadaten der Station Einsiedeln von der MeteoSchweiz. Die untersuchten Zeitreihen deckten einen Zeitraum vom 01.01.1968 bis zum 31.12.1984 ab. Für die Zeitreihenanalysen und die Modellierung der Abflussdaten wurden Temperatur-, Niederschlag- und Abflusswerte aus den vorgestellten Einzugsgebieten und Messstationen verwendet.

Die Qualität der Daten und ihre Korrektur sind wichtig um repräsentative Resultate zu erhalten und ihre Unsicherheiten zu kennen. Aus diesem Grund wurden vor den statistischen Auswertungen der hydrologischen Zeitreihenanalysen verschiedene Annahmen getroffen: Die Daten sollten homogen, stationär, unperiodisch sein und keinen Trend auf weisen. Homogen bedeutet, dass die jeweilige Datenreihe zu einer Grundgesamtheit gehört und dadurch einen zeitunabhängigen Mittelwert hat. Durch veränderte Messmethoden oder Umweltbedingungen kann es somit zu nicht-homogenen Daten kommen (Fernando und Jayawardena, 1994). Mit der Stationarität wird angenommen, dass sich die Datenreihen von zeitlich und räumlich unterschiedlichen Messungen nicht verändern, ausser aufgrund unterschiedlicher Probeentnahmen (Shahin et al., 1993). Besteht zwischen den Messungen eine zeitliche Abhängigkeit wird dies als Trend bezeichnet. Ein Trend bei hydrologischen Daten kann durch natürliche oder anthropogene Veränderungen zu Stande kommen (Machiwal und Jha, 2008). Bei der Analyse von natürlichen Zeitreihen sind diese zuvor genannten Annahmen nur in den wenigsten Fällen erfüllt (Rao et al., 2003). Dadurch müssen für hydrologische Zeitreihenanalysen vorhergehende statistische Analysen der Daten durchgeführt werden (Adeloye und Montaseri, 2002), um diese für eine weitere Bearbeitung auf die genannten Annahmen zu überprüfen (Machiwal und Jha, 2008).

Aus diesem Grund wurden alle originalen Zeitreihen auf Homogenität, Stationarität und Trends hin untersucht. In einem weiteren Schritt wurden ausserdem die Zeitreihen einer Double-Mass-Analyse unterzogen um die Datensätze der unterschiedlichen Einzugsgebiete zu vergleichen.

Homogenität-Test

Vor der Analyse hydrologischer und klimatologischer Zeitreihen ist die Homogenität der Messreihen zu prüfen, denn meteorologische Messreihen sind nicht nur durch die Variationen des Klimas sondern auch durch nicht-klimatische Veränderungen beeinflusst. Abweichungen in den vorhandenen Messreihen können durch Änderungen in der Mess- und Auswertungstechnik, Beobachterwechsel und Veränderungen in der Umgebung der Messstationen sowie Stationsverlegungen geschehen (Herzog und Müller-Westermeier, 1997). Für die Überprüfung wurde der Standardhomogenitätstest (SNHT) genutzt, welcher von Alexandersson (1986) in Schweden entwickelt wurde. Der Test prüft eine standardisierte Quotientenreihe beziehungsweise Differenzenreihe. Das Verfahren wurde auf die Zeitreihen

der verschiedenen Monatswerte angewendet, da eine Homogenisierung von Tageswerten nicht möglich ist (Herzog und Müller-Westermeier, 1997).

Stationarität-Test

Der Stationarität-Test überprüft die Variation der Mittelwerte oder Varianzen einer Zeitreihe über einen bestimmten Zeitraum (Wang et al., 2005). Als stationär wird eine Zeitreihe bezeichnet, welche keine systematischen Veränderungen am Gesamtbild aufweist. Stationarität beinhaltet, dass statistische Parameter, die aus verschiedenen Teilserien berechnet werden, nicht zu stark voneinander abweichen (Lange, 2006). Es gibt zwei gängige Methoden zur Überprüfung einer Zeitreihe auf ihre Stationarität. Einerseits gibt es den Dickey-Fuller Einheitswurzeltest (ADF) (Differenz Stationarität), welcher von Dickey und Fuller (1979) eingeführt und durch Said und Dickey (1984) weiterentwickelt wurde. Andererseits gibt es den Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) Test, welcher durch Kwiatkowski et al. (1992) ausgearbeitet wurde. Dieser Test bestimmt die Stationarität über einen deterministischen Trend (Trend-Stationarität). Für diese Arbeit wurde der ADF-Test zur Überprüfung der Daten auf Stationarität genutzt, weil ein Versuch durch Shin und Schmidt (1992) zeigte, dass für die Bestimmung der Stationarität in Zeitreihen der Einheitswurzeltest besser geeignet ist als der KPSS-Test.

Trend-Test

Ein Trend bezeichnet eine statistisch erfassbare Grundtendenz in Zeitreihen, welcher die Richtung der Entwicklung über die Zeit anzeigt. Im Falle einer Klimazeitreihe beschreibt er das langfristige Verhalten gewisser Merkmale des Klimasystems und dient damit der Ermittlung einer möglichen Klimaänderung (Lange, 2006). Für die Überprüfung der Zeitserien auf einen Trend wurde der Mann-Kendall-Trendtest angewendet und um zusätzlich die Saisonalität der Daten zu berücksichtigen, wurde der saisonale Mann-Kendall-Trendtest genutzt (Birsan et al., 2005). Für monatliche Daten mit einer Saisonalität von 12 Monaten, wurde somit kein globales Ansteigen der Zeitserie überprüft, sondern einfach ob von einem Januar zum nächsten, von einem Februar zum nächsten, usw. eine Tendenz festgestellt werden kann (Wang et al., 2005; Longobardi et al., 2001).

Je kürzer das zu untersuchende Zeitfenster ist, umso veränderlicher verhält sich der Trend. Aus diesem Grund wurden die Zeitreihen bezüglich Trend auf ihre Monats- und Jahreswerte hin untersucht. Der nicht-parametrische Test auf Trends nach Mann-Kendall ist ein auf Rängen basierender Trendtest und kann daher gut für Datensätze mit Ausreißern angewendet werden (Mann, 1945; Kendall, 1948; Hirsch et al., 1982; Hirsch und Slack, 1984). Weitere Vorteile des Mann-Kendall-Trendtests bestehen darin, dass der Test sowohl lineare als auch nicht-lineare Tendenzen zu detektieren vermag und keine Normalverteilung der Daten erfordert, welche bei klimatologischen und hydrologischen Datenreihen selten gegeben sind (Helsel und Hirsch, 1992). Ein Nachteil des Trendtests ist, dass er voneinander unabhängige Beobachtungen benötigt, also keine signifikante Korrelation zwischen den Serien mit sich selbst und einer gegebenen Verschiebung zulässt (von Storch, 1995).

Double-Mass-Analyse

Die Double-Mass-Analyse wird bei hydrologischen Zeitreihen verwendet, um die Daten einer einzelnen Messstation mit Daten von mehreren Messstationen zu vergleichen und auf ihre Übereinstimmung zu prüfen. Dabei werden die kumulierten Daten eines Klimaparameters der einen Station mit den Daten einer oder mehreren anderen Messstationen gegenübergestellt. Existiert zwischen den Gebieten ein

festes Verhältnis widerspiegelt sich dies in einer geraden Double-Mass-Kurve, welche die 1:1 Linie überdeckt. Sprünge oder Lücken in der Double-Mass-Kurve ergeben sich aufgrund veränderter Messmethoden oder physikalischen Veränderungen im untersuchten Gebiet. Je länger die Zeitreihe ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es physikalische Veränderungen der natürlichen und anthropogenen Umwelt oder der Messmethoden gegeben hat. Sollten die Unstimmigkeiten der Daten auf veränderte Messmethoden beruhen, ist eine Korrektur der Daten notwendig, um den Effekt von weiteren Veränderungen zu eruieren. Steigungsbrüche in der Double-Mass-Kurve zeigen den Zeitpunkt der Veränderungen zwischen den untersuchten Zeitreihen an und die Differenz der Steigung vor und nach dem Bruch markiert das Ausmass der Veränderung. Die Double-Mass-Kurve sollte im 45° Winkel zu den Achsen verlaufen, um die Steigungsänderung besser zu erkennen (Merriam, 1937). Durch die Verwendung von Mittelwerten mehrerer Messstationen wird der Einfluss von Messunstimmigkeiten bei einer einzelnen Station geringer. Ausserdem sollten sich die Stationen auf einer genug kleinen Fläche befinden, damit sie von den gleichen Wetterbedingungen beeinflusst werden. Aufgrund der Variabilität von hydrologischen Daten können ebenfalls falsche Brüche in der Double-Mass-Kurve entstehen. Aus diesem Grund werden nur Brüche beachtet, welche länger als fünf Jahre andauern, denn diese wurden mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit, nicht durch Zufall, sondern durch grundlegende Veränderungen verursacht. Die Double-Mass-Analyse muss je nach Art der hydrologischen Daten unterschiedlich analysiert werden. Wird eine lineare Beziehung zwischen zwei Dateneinheiten angenommen und als lineare Gleichung ausgedrückt, so mag diese Annahme für Niederschlagsdaten stimmen, jedoch sind Abflussdaten wesentlich komplexer und die Annahme trifft in vielen Fällen nicht zu (Secarcy und Hardison, 1960).

3.1.1 Temperaturdaten

Die Temperaturdaten, welche als Tagestemperaturen [°C] vorliegen, wurden bereits in digitalisierter Form von der Universität Zürich zur Verfügung gestellt. Die zu untersuchenden Zeitreihen waren mit Ausnahme derjenigen des Vogelbachgebiets sehr lückenhaft. Vom Einzugsgebiet des Teufbachs waren keine Datenwerte vorhanden (Abb. 4).

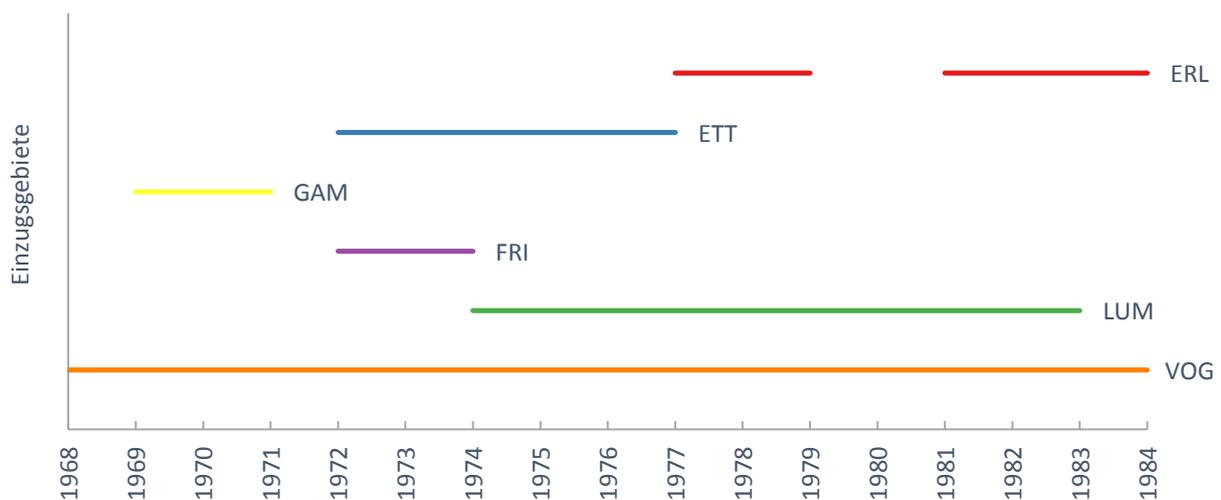


Abbildung 4: Überblick über die verfügbaren Temperaturzeitreihen im südlichen Alptal von 01.01.1968 bis 31.12.1984.

Die erste Beurteilung der Lufttemperaturdaten auf ihre Qualität erfolgte durch die graphische Darstellung der Tages-, Monats- und Jahreswerte. Ein Beispiel hierfür zeigt die Abbildung 5, in welcher die Zeitreihen der Lufttemperaturtageswerte des Vogel-, Lämpenen- und Etterenbachgebiets dargestellt sind.

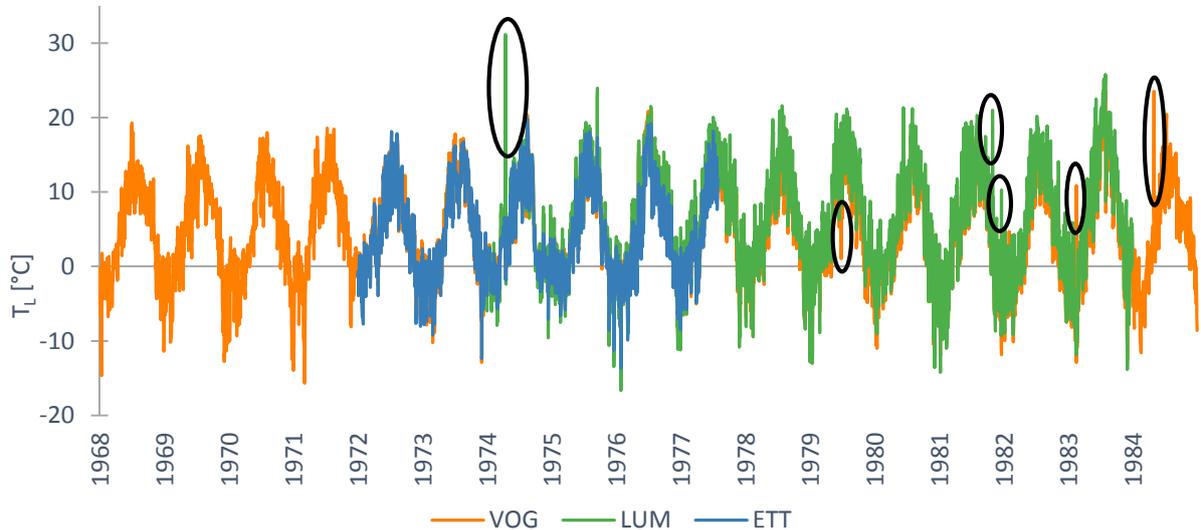


Abbildung 5: Lufttemperaturzeitreihen der Einzugsgebiete Vogel-, Lämpenen- und Etterenbach für die Zeitperiode vom 01.01.1968 bis 31.12.1984: Lufttemperatur (T_L), unplausible Tageswerte (Kreis).

Die unplausiblen Lufttemperaturdatenwerte, welche zum Teil in der Abbildung 5 eingezeichnet sind, wurden manuell angepasst (Tab. 8). Für die Korrektur einzelner Tageswerte wurde meistens der Mittelwert aus dem Vortag und dem nachfolgenden Tag angewendet. Im Fall des Tageswerts vom 28.03.1973 wurde bloss das Vorzeichen geändert. Bei den restlichen Einzugsgebieten wurden in Bezug auf die Lufttemperaturen keine Änderungen vorgenommen.

Tabelle 8: Übersicht über die manuell angepassten Lufttemperaturwerte.

EZG	Datum	alter Wert [°C]	neuer Wert [°C]	Anpassung
VOG	01.05.84	23.50	4.81	Mittelwert
	28.06.79	1.03	15.30	Mittelwert
	18.02.83	10.85	-10.85	Vorzeichen
	08.11.82	11.60	6.44	Mittelwert
LUM	16.04.74	31.15	-0.10	Mittelwert
	31.10.81	20.99	6.23	Mittelwert
	20.12.81	10.28	-5.98	Mittelwert
ETT	28.03.73	-	2.06	Mittelwert

Nach diesen Korrekturen konnten die originalen Lufttemperaturen für weitere Analysen, wie die Überprüfung der Datenqualität sowie die Komplettierung der Zeitreihen benutzt werden.

Die Tabelle 9 umfasst die Resultate der Datenqualitätstests zusammen. Wie bereits erwähnt wurden die Tests auf die Monats- sowie die Jahresmittelwerte angewandt, wobei nicht alle Zeitreihen ausgewertet wurden, da einige zu kurz für eine Überprüfung waren. Die Double-Mass-Kurve berücksichtigt die Tageswerte, um eine möglichst lange Zeitreihe mit einzubeziehen. Dafür mussten die Daten in Kelvin umgerechnet werden, da negative Werte zu falschen Schlussfolgerungen führten.

Tabelle 9: Übersicht über die Datenqualität der Temperaturzeitreihen der untersuchten Gebiete. Keine Daten sind vom Einzugsgebiet des Teufbachs verfügbar: Homogenitäts-Test (Ja, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist homogen; Nein, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist inhomogen), Stationaritäts-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist stationär (keine Einheitswurzel); Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist nicht stationär (Einheitswurzel), Trend-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe zeigt Trend; Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe zeigt kein Trend), N/A (nicht auswertbar), Double-Mass-Kurve (0, keine Abweichung von der 1:1 Linie).

Test	Zeitskala	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL
Homogenität	Monat	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Jahr	Ja	Ja	N/A	N/A	Ja	Ja
Stationarität	Monat	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
	Jahr	Nein	Nein	N/A	N/A	Ja	Ja
Trend	Monat	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Jahr	Nein	Nein	N/A	N/A	Nein	Nein
Saisonaler Trend	Monat	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
Double-Mass-Analyse	Tag	0	0	0	0	0	0

Die Temperaturzeitreihen wiesen eine gute Qualität auf. Alle untersuchten Datenreihen waren signifikant homogen. Mit Ausnahme der Monatsmittelwerte des Gämischbachgebiets und der Jahresmittelwerte des Vogel- und des Lümpenenbachgebiets hatten sich alle Zeitreihen als signifikant stationär herausgestellt. Der Mann-Kendall-Trend Test zeigte keine signifikanten Tendenzen in den Serien an, jedoch sind schwach signifikante saisonale Trends im Lümpenen- und dem Erlenbachgebiet auszumachen. Bei der Double-Mass-Analyse führten die summierten Temperaturzeitreihen zu grossen Summen, weswegen ein Über- bzw. Unterschätzung einzelner Gebietszeitreihen nicht festzustellen war. Die Double-Mass-Kurven folgten somit allesamt ungefähr der 1:1 Linie.

3.1.2 Niederschlagsdaten

Für jedes einzelne Einzugsgebiet im südlichen Alptal gibt es einen Ordner mit analogen Niederschlagsdaten (Abb. 6). In einem ersten Schritt wurden die analogen Daten mittels Scanner in eine digitale Form gebracht. Die Digitalisierung der Daten erfolgte durch eine Texterkennungssoftware namens ReadIris. Da die Software die Zahlen oftmals nicht erkannte bzw. als andere Zahlen oder Zeichen identifizierte, wurden die digitalisierten Daten im Nachhinein in einer Excel-Tabelle kontrolliert. Die grössten Probleme hatte ReadIris mit der Unterscheidung der Zahlen 1 und 7 sowie die Zahlen 5, 6 und 8 wurden oftmals verwechselt.

TAGESNIEDERSCHLAGE DES GEBIETES A7 IM JAHRE 1969

THIessenWERTE LAUTEN: DATUM	GEBIET A7	.6107 A7A T	.3893 A7B T
1 1 1 69		3.5 MM	3.3 MM
2 2 1 69	3	5.3 MM	4.9 MM
3 3 1 69	3	8.0 MM	7.4 MM
4 4 1 69		0.0 MM	0.0 MM
5 5 1 69	3	4.4 MM	4.1 MM
6 6 1 69	3	2.2 MM	2.0 MM
7 7 1 69		0.0 MM	0.0 MM
8 8 1 69		0.0 MM	0.0 MM
9 9 1 69		0.0 MM	0.0 MM
10 10 1 69		0.0 MM	0.0 MM
11 11 1 69		0.0 MM	0.0 MM
12 12 1 69		0.0 MM	0.0 MM
13 13 1 69		0.0 MM	0.0 MM
14 14 1 69		0.0 MM	0.0 MM
15 15 1 69	3	2.7 MM	2.5 MM
16 16 1 69	3	1.8 MM	1.6 MM
17 17 1 69		0.0 MM	0.0 MM
18 18 1 69	3	6.2 MM	5.7 MM
19 19 1 69	3	4.9 MM	4.5 MM
20 20 1 69		0.0 MM	0.0 MM
21 21 1 69		0.0 MM	0.0 MM
22 22 1 69		0.0 MM	0.0 MM
23 23 1 69		7.0 MM	6.5 MM
24 24 1 69		.4 MM	.4 MM
25 25 1 69		0.0 MM	0.0 MM
26 26 1 69		0.0 MM	0.0 MM
27 27 1 69		0.0 MM	0.0 MM
28 28 1 69		0.0 MM	0.0 MM
29 29 1 69	3	10.1 MM	9.4 MM
30 30 1 69	3	13.3 MM	12.3 MM
31 31 1 69		0.0 MM	0.0 MM
MONATSSUMME		69.8 MM	64.6 MM
			77.9 MM

Abbildung 6: Analoges Niederschlagsdatenblatt des Gämischbachgebiets.

In der Abbildung 7 sind die verfügbaren Zeitreihen der Niederschlagsmessstationen ersichtlich. Die Messstationen sind im südlichen Alptal auf unterschiedlichen Höhen und Expositionen verteilt und der Niederschlag wurde durch Totalisatoren, Niederschlagswaagen oder Wippen gemessen (Tab. 7).

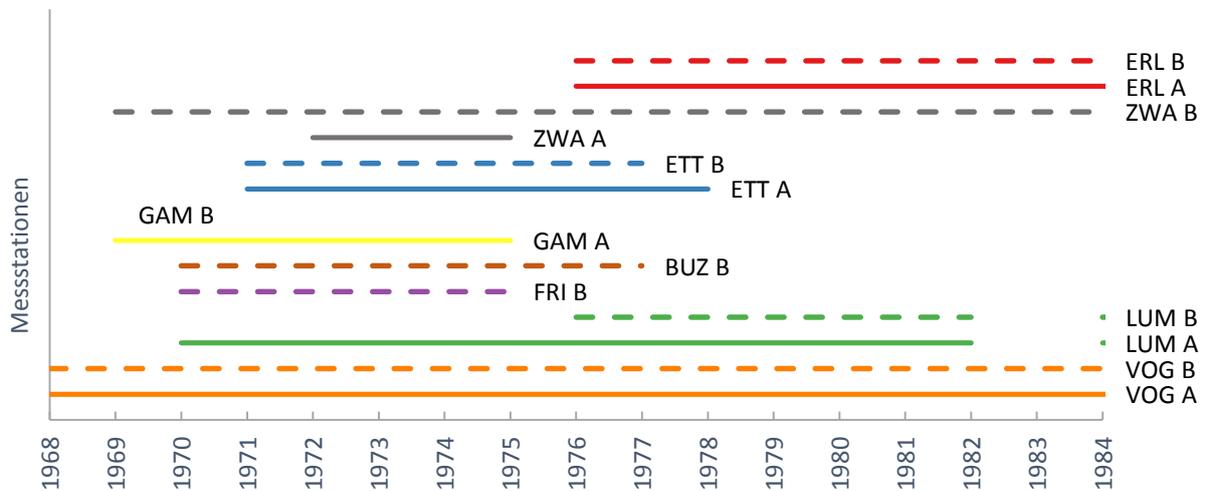


Abbildung 6: Überblick über die vorhandenen Niederschlagsdaten im südlichen Alptal für die Untersuchungsperiode von 01.01.1968 bis zum 31.12.1984: Untere Höhenstufe (1150 bis 1260 m ü. M.) (gestrichelte Linie), Obere Höhenstufe (1410 bis 1470 m ü. M.) (durchgezogene Linie).

Die Korrektur der originalen Niederschlagsdaten beschränkt sich auf einen Wert, welcher am 11.08.1971 bei der Messstation ZWA B im Zwäckentobel gemessen wurde. Der Datenwert wurde manuell von 16.5 auf 56 mm d⁻¹ korrigiert aufgrund einer Randnotiz auf dem analogen Datenblatt. Die 56 mm d⁻¹ Niederschlag entsprechen dem Tagesmittelwert aller Stationen am 11. 08.1971.

Die Qualität der Zeitreihen war vergleichbar mit denjenigen der Temperaturdatensätzen. Die Zeitserien der monatlichen Niederschlagssummen waren signifikant homogen und auch die jährlichen Niederschlagssummen waren mit Ausnahme der Station ETT A signifikant homogen. Die monatlichen Niederschlagssummen besaßen ebenfalls keine Einheitswurzel und waren somit signifikant stationär mit Ausnahme der Messstation GAM B, welche jedoch eine Zeitreihenlänge von einem Jahr aufwies und darum das Resultat nicht aussagekräftig war. Ein ähnliches Bild zeigte sich bei den monatlichen Trends, wobei nur die Niederschlagsserie des Station GAM B einen signifikanten Trend aufwies. Ein signifikanter saisonaler Trend war nur bei der Zeitserie ETT A auszumachen. Ansonsten waren keine Tendenzen in Bezug auf die monatlichen und jährlichen Niederschlagssummen vorhanden. Die Double-Mass-Kurven zeigten hauptsächlich bei den Stationen FRI B, GAM A und ZWA A Abweichungen zur 1:1 Linie, jedoch waren keine grosse Sprünge oder Brüche ersichtlich (Tab. 10).

Tabelle 10: Übersicht über die Datenqualität der Niederschlagszeitreihen der verschiedenen Messstationen im südlichen Alpen: Homogenitäts-Test (Ja, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist homogen; Nein, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist inhomogen), Stationaritäts-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist stationär (keine Einheitswurzel); Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist nicht stationär (Einheitswurzel)), Trend-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe zeigt Trend; Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe zeigt kein Trend), N/A (nicht auswertbar), Double-Mass-Kurve (0, keine Abweichung; - geringe Unterschätzung, --mittlere Unterschätzung, + geringe Überschätzung in Bezug zur 1:1 Linie).

Messstation	Homogenität		Stationarität		Trend		Saisonaler Trend	Double-Mass
	Monat	Jahr	Monat	Jahr	Monat	Jahr	Monat	Tag
VOG A	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	0
VOG B	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	0-
LUM A	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	0
LUM B	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	0
FRI B	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	--
BUZ B	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	0-
GAM A	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	--
GAM B	Ja	N/A	Nein	N/A	Ja	N/A	N/A	0
ETT A	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	0--
ETT B	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	0
ZWA A	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	0+
ZWA B	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	--
ERL A	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	0+
ERL B	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	0

3.1.3 Abflussdaten

Die Abflusswerte wurden, wie die Temperaturwerte, bereits vom Geographischen Institut der Universität Zürich digitalisiert. Die Datensätze lagen als mittlere Tagesabflusswerte [$l\ s^{-1}\ km^2$] vor. Jedoch wiesen die Zeitreihen der sieben untersuchten Gebiete wiederum grosse Datenlücken auf (Abb. 8). Durch die vorgenommene Standardisierung waren die einzelnen Einzugsgebiete unabhängig von ihrer tatsächlichen Fläche gut zu vergleichen. Neben der Digitalisierung wurden bereits durch Ellen Cerwinka und Yves Götz (2013) erste Datenanalysen und statistische Auswertungen durchgeführt.

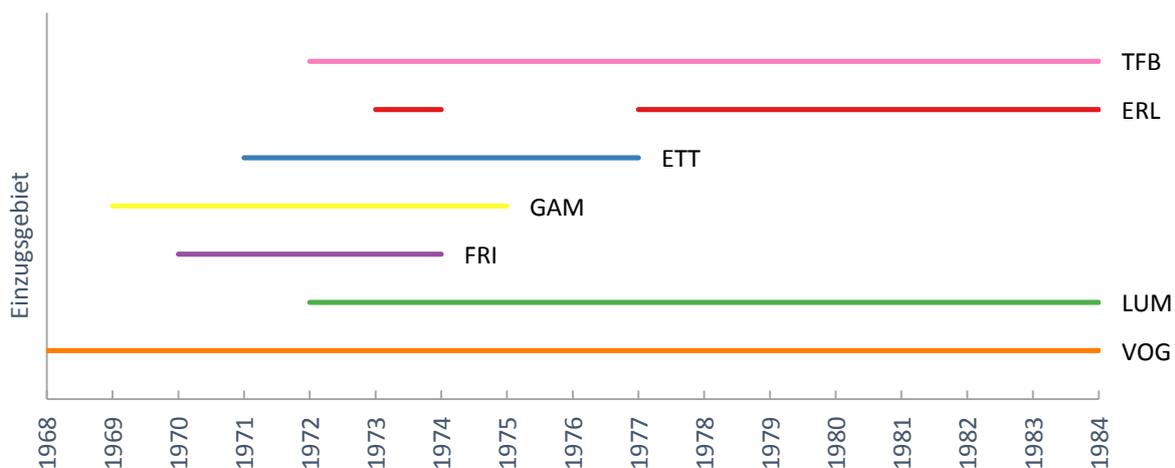


Abbildung 7: Übersicht über die vorhandenen Abflussdaten der untersuchten Einzugsgebiete von 01.01.1968 bis 31.12.1984.

Innerhalb der lückenhaften Abflussdatensätze fehlten einige Tageswerte, welche grösstenteils durch Mittelwerte berechnet wurden (Tab. 11). Die Interpolation im Gämischbachgebiet erfolgte aufgrund der Grösse der Datenlücke nicht durch das Ersetzen der fehlenden Tageswerte mit Hilfe des Mittelwerts, sondern durch die Simulierung der Werte mit dem HBV-Modell. Der fehlende Wert am 25.05.1977 aus der Abflussreihe des Teufbachs wurde durch den Wert des Vortags ersetzt, da während diesen Tagen kein Niederschlag fiel und die Zeit der Schneeschmelze vorbei war.

Tabelle 11: Fehlende Datenwerte in den Abflusszeitreihen und ihre Interpolationsart.

Gebiet	Datum	Interpolation
VOG	25.03.83	Mittelwert
FRI	16.01.71	Mittelwert
GAM	13.07.75 - 30.07.75	Modellierung
ETT	20.02.76	Mittelwert
TFB	15.12.73	Mittelwert
TFB	25.05.77	Vortag

Die Qualität der Abflussdatensätze zeigte ein ähnliches Bild wie dasjenige der Temperatur- und Niederschlagszeitreihen mit Ausnahme des Ergebnisses aus der Double-Mass-Analyse. Die monatlichen Abflussdaten sind homogen, stationär und weisen keine Tendenzen in den Datensätzen auf. Die Ausnahme bildet der schwach, saisonale Trend der Abflusszeitreihe des Vogelbachs. Die Zeitserien der Jahressummen weisen keinen Trend auf und sind mit Ausnahme der Daten aus dem Etterenbach homogen. Stationäre Zeitreihen sind für die Jahreswerte bloss vom Frifang- und dem Gämischbachgebiet vorhanden (Tab. 12). Die Datenqualität der jährlichen Abflusssummen müssen jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, da meist nur wenige Jahreswerte zu Verfügung standen. Aussagekräftiger in Bezug auf die Abflusssummen sind die Double-Mass-Kurven (Abb. 5).

Tabelle 12: Übersicht über die Datenqualität der Abflusszeitreihen der verschiedenen Einzugsgebiete im südlichen Aiptal: Homogenitäts-Test (Ja, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist homogen; Nein, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist inhomogen), Stationaritäts-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe ist stationär (keine Einheitswurzel); Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe ist nicht stationär (Einheitswurzel), Trend-Test (Ja, Annahme der H_1 , Zeitreihe zeigt Trend; Nein, Annahme der H_0 , Zeitreihe zeigt kein Trend), N/A (nicht auswertbar), Double-Mass-Kurve (0, keine Abweichung; - geringe Unterschätzung, --mittlere Unterschätzung, --- grobe Unterschätzung, + geringe Überschätzung, ++ mittlere Überschätzung, +++ grobe Überschätzung in Bezug zur 1:1 Linie).

Test	Zeitskala	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
Homogenität	Monat	Ja						
	Jahr	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Stationarität	Monat	Ja						
	Jahr	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Trend	Monat	Nein						
	Jahr	Nein						
Saisonaler Trend	Monat	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Double-Mass-Analyse	Tag	0--	+++	0-	0---	++	+	---

In den Abbildungen 9a und 9b lässt sich gut erkennen, dass die Abflussdaten des Vogelbachs zuerst der 1:1-Linie folgen und sich die Datenreihe somit wie der Mittelwert der anderen Datensätze verhält. Ab einem gewissen Datum werden jedoch die Abflusswerte gegenüber dem Mittelwert der anderen Bäche unterschätzt. Im Lümpenenbach sind die Abflusswerte bereits seit Beginn der Zeitreihe 1968 höher als der Mittelwert der anderen Gebiete und werden somit stark überschätzt.

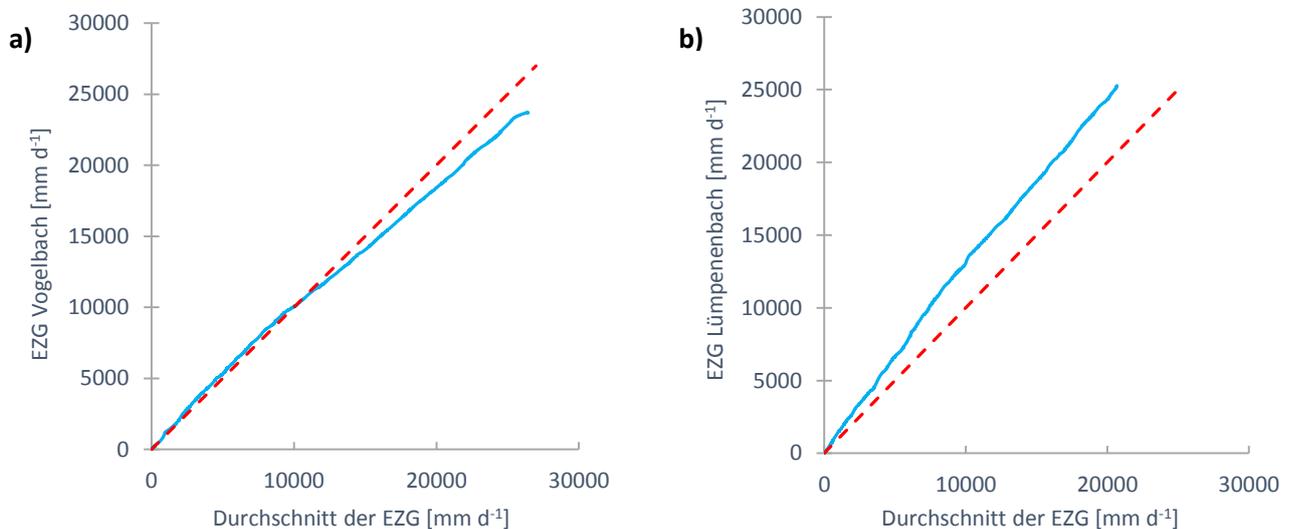


Abbildung 8: Double-Mass-Kurven des Vogelbachs (a) und des Lümpenenbachs (b) in Bezug auf die täglichen Abflusswerte: Einzugsgebiet (EZG), 1:1-Linie (gestrichelte Linie), Double-Mass-Kurve (durchgezogene Linie).

Wie aus den Diagrammen zur Datengrundlage ersichtlich ist, wiesen die Zeitreihen der Temperatur-, Abfluss- und Niederschlagsdatensätze Lücken und fehlerhafte Messwerte auf. Die Gründe hierfür reichen von routinemässigen Wartungen über systematische Messfehler bis hin zu ungeplanten Totalausfällen. Grundsätzlich kann auch eine temporäre Schliessung, ein Neubau oder die Zerstörung der Messstationen Datenlücken in den Zeitreihen verursachen. Eine weitere Quelle für Datenlücken ist in den Sensoren selbst zu suchen. Sind die Messinstrumente einer hohen Beanspruchung durch Starkniederschläge, Hochwasser, Frost, Trockenheit oder Hitze ausgesetzt, können diese keine oder fehlerhafte Werte liefern. Auch Alterung, Verschmutzung oder Schwankungen in der Stromversorgung können für den Ausfall von Stationen verantwortlich sein. Eine ungenaue Kalibrierung der Messgeräte kann ebenfalls zu Fehlern innerhalb der Zeitreihe führen. Neben all den technischen Gründen kommen auch andere Ursachen für unzuverlässige Daten in Frage, wie der Wechsel des Beobachters, eine Zeitänderung der Beobachtung oder das Baumwachstum in unmittelbarer Umgebung einer Klimastation, die Veränderung des Wasserangebotes oder der Vegetation in unmittelbarer Nähe der Messstation (Allen et al., 1998).

3.2 Inter- und extrapolierte Daten

Für die Kalibrierung und Modellierung der Abflusszeitreihen mit dem HBV-Modell wurden vollständige Zeitreihen benötigt. Aus diesem Grund erfolgte nach der Bereinigung (Kap. 3.1) die Komplettierung der Temperatur- und Niederschlagsdatensätze. Es existieren Methoden zur Komplettierung fehlender Daten zwischen bekannten Werten auf der Grundlage der jeweiligen Zeitreihe (zeitliche Interpolation) sowie unter Benützung benachbarter Referenzstationen (räumliche Interpolation). In dieser Arbeit wurde die räumliche Interpolation verwendet, bei welcher Messwerte von umliegenden Stationen

für die Berechnungen berücksichtigt wurden (Rapp, 2001). Dabei wurden die Thiessen-Polygon-Methode (Kap. 3.2.1.1) und lineare oder multiple lineare Regressionsbeziehungen zur Berechnung der fehlenden Werte verwendet. Die Regressionsbeziehungen wurden anhand der Datenanalyse- und Statistiksoftware XLSTAT berechnet. Die Vorgehensweise des Interpolationsverfahrens mit XLSTAT wird anhand der Komplettierung der Lufttemperaturzeitreihe des Einzugsgebiets des Lümpenenbachs erklärt.

3.2.1 Temperaturdaten

Vom Einzugsgebiet des Lümpenenbachs waren Temperaturwerte vom 01.01.1974 bis zum 31.12.1983 vorhanden. Die fehlenden Daten für den Zeitraum von 01.01.1968 bis 31.12.1973 wurden mit Hilfe von Regressionsgleichungen berechnet, welche anhand von Korrelationen zu anderen Gebietszeitreihen ermittelt wurden. Die Zeitreihe des Einzugsgebiets des Gämschbachs wurde nicht berücksichtigt, da diese Zeitserie zu kurz war, um sinnvolle Regressionen bzw. Korrelationen zu ergeben. Aus diesem Grund standen für die Berechnung der Temperaturwerte von 1968 bis 1971 nur die Daten des Vogelbachgebiets zur Verfügung. In diesem Beispiel entspricht die Zeitreihe des Lümpenenbachgebiets der abhängigen Variable und die Zeitreihe des Vogelbachgebiets der erklärenden Variable.

Die Tabellen 13 bis 16 und die Modellgleichung (Gl. 1) stellen den modifizierten Output der Regressionsanalyse der Statistiksoftware XLSTAT dar.

In der Tabelle 13 ist die Korrelationsmatrix ersichtlich, welche die Ähnlichkeit zwischen den Temperaturzeitreihen des Einzugsgebiets Vogelbach und Lümpenenbach anzeigt.

Tabelle 13: Korrelationsmatrix bezüglich der Lufttemperatur zwischen dem Vogel- und Lümpenenbachgebiet: 1 = Perfekte Korrelation, 0 = keine Korrelation.

EZG	VOG	LUM
VOG	1.000	0.981
LUM	0.981	1.000

Die Tabelle 14 stellt Koeffizienten der Anpassungsgüte des linearen Modells dar. Das Bestimmtheitsmass beziehungsweise der Determinationskoeffizient R^2 gibt den Prozentsatz der Variabilität der abhängigen Variablen (Lufttemperatur des Lümpenenbachgebiets) an, welche durch die erklärende Variable (Lufttemperatur des Vogelbachgebiets) beschrieben wird. Je näher R^2 bei 1 liegt, desto besser ist die lineare Anpassung. In diesem Fall wurden 96 % der Variabilität der Lufttemperatur des Lümpenenbachgebiets durch die Lufttemperaturdaten des Vogelbachgebiets erklärt. Der Rest der Variabilität ist auf andere Effekte zurückzuführen wie beispielsweise andere erklärenden Variablen, welche nicht in die Analyse mit eingeschlossen wurden (XLSTAT, 2015).

Tabelle 14: Koeffizienten der Anpassungsgüte aus der Regressionsanalyse zwischen dem Lümpenen- und dem Vogelbachgebiet: Bestimmtheitsmass (R^2), Mittlere quadratische Abweichung (MSE), Wurzel aus der mittleren, quadratischen Abweichung (RMSE).

Anpassungskoeffizienten:	
R^2	0.962
MSE	2.052
RMSE	1.432

Ausserdem war es wichtig die Resultate der Varianzanalyse zu betrachten, da diese Ergebnisse für die Entscheidung berücksichtigt wurden, ob die erklärende(n) Variable(n) eine signifikante Information (H_0) in das Modell einbringt oder nicht. Ist der F-Wert unter 0.0001 ist das Risiko, dass die Annahme der Nullhypothese (kein Einfluss der erklärenden Variablen) falsch ist, kleiner als 0.01 %. In diesem Fall brachte die erklärende Variable (Lufttemperatur im Vogelbachgebiet) eine signifikante Information ein, welche für die Berechnung der fehlenden Lufttemperaturdaten des Lämpenenbachgebiets notwendig war (XLSTAT, 2015).

Tabelle 15: Output der Varianzanalyse der Statistiksoftware XLSTAT: Zahl der Freiheitsgrade (DF).

Quelle	DF	Quadratsumme	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Modell	1	187738.649	187738.649	91495.938	< 0.0001
Fehler	3650	7489.361	2.052		
Gesamt korrigiert	3651	195228.010			

Berechnet gegen Modell $Y = \text{Mean}(Y)$

Zum Schluss des Outputs war die Modellgleichung (Gl. 1) ersichtlich, mit welcher die fehlenden Tageswerte der Lufttemperaturzeitreihe des Lämpenenbachgebiets von 1968 bis 1971 anhand des Vogelbachgebiets geschätzt wurden.

$$\text{Lämpenengebiet} = 0.873918565405836 + 1.06752104251628 \times \text{Vogelbach} \quad (1)$$

Für die fehlenden Daten der Jahre 1972 und 1973 standen zusätzlich zu den Daten des Vogelbachgebiets die Tageswerte der Einzugsgebiete des Frifang- und Etterenbachs zur Verfügung. Aus diesem Grund könnten die fehlenden Lufttemperaturdaten des Lämpenenbachgebiets für diese Zeit mit den erklärenden Variablen Vogelbach, Frifangbach, Etterenbach, Vogel- und Frifangbach, Vogel- und Etterenbach, Frifang- und Etterenbach, Vogel-, Frifang- und Etterenbach berechnet beziehungsweise geschätzt werden.

Von all diesen Möglichkeiten wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt (Tab. 9) und die Anpassungskoeffizienten verglichen, um herauszufinden, mit welcher Regressionsgleichung man die besten Vorhersagen (Annäherungen) machen kann. R^2 ist bei der Kombination des Vogelbach- und Etterenbachgebiets am nächsten bei 1, somit wurde diese erklärende Variable für die Berechnung der Tageswerte der Jahre 1972 und 1973 des Lämpenenbachgebiets verwendet. Für das Jahr 1984 gibt es die Möglichkeit die Daten des Vogel- oder Erlenbachs oder eine Kombination dieser zwei Einzugsgebiete zu gebrauchen. Auf diese Art und Weise wurden die gesamten Zeitreihen der Lufttemperaturen inter- und extrapoliert. Welche Einzugsgebietsdaten den besten Anpassungskoeffizienten ergeben haben und für welchen Zeitraum und Einzugsgebiete diese für die Inter- und Extrapolation genutzt wurden ist in der Tabelle 16 ersichtlich.

Tabelle 16: Überblick über die verwendeten erklärenden Variablen für die Berechnung der fehlenden Datenwerte: Bestimmtheitsmass (R^2)

EZG (abhängige Variable)	Zeitraum	EZG (erklärende Variable)	R^2
LUM	01.01.68 - 31.12.71	VOG	0.962
	01.01.72 - 31.12.73	VOG, ETT	0.970
	01.01.84 - 31.12.84	VOG, ERL	0.981
FRI	01.01.68 - 31.12.71	VOG	0.980
	28.06.74 - 30.07.77	VOG, LUM, ETT	0.988
	31.07.77 - 31.12.83	VOG, LUM	0.980
	01.01.84 - 31.12.84	VOG	0.980
GAM	01.01.68 - 01.10.69	VOG	0.988
	01.05.71 - 31.12.84	VOG	0.988
ETT	01.01.68 - 31.12.71	VOG	0.973
	31.07.77 - 31.12.83	VOG, LUM	0.973
	01.01.84 - 31.12.84	VOG	0.973
ERL	01.01.68 - 17.11.77	VOG	0.932
	01.01.80 - 17.12.81	LUM	0.953
	01.01.84 - 31.12.84	VOG	0.932

Falls das Bestimmtheitsmass für mehrere erklärende Variablen gleich gross war, wurde die erklärende Variable (Einzugsgebiet) mit dem kleineren RMSE-Wert bevorzugt (Tab. 14). Die Methode der linearen oder multiplen linearen Regression wurde gewählt, da keine erkennbare Höhenabhängigkeit der verschiedenen Lufttemperaturzeitreihen feststellbar war. Die Messstationen der Lufttemperaturen befinden sich alle auf einem ähnlichen Höhenniveau (Tab. 6). In der Tabelle 16 ist ersichtlich, dass die meisten Tageswerte durch Daten aus dem Vogelbachgebiet erklärt wurden. Die Ursache hierfür lag in der kompletten Zeitreihe des Vogelbachgebiets. Für Jahre wie zum Beispiel 1968 bis 1971 waren keine anderen Datensätze, wie diejenigen des Vogelbachgebiets, für die Vorhersage vorhanden.

Wie bereits erwähnt waren keine Temperaturwerte des Teufbachgebiets vorhanden. Diese Daten wurden anhand der Thiessen-Polygon-Methode berechnet.

3.2.1.1 Thiessen-Polygon (-Methode)

Die Methode der Thiessen-Polygone kann als Spezialfall der Inversen Distanzgewichtung (IDW) angesehen werden und wird genutzt, um Nähe (Proximität) beziehungsweise Nachbarschaften zu analysieren (WaSiM, 2015; GITTA, 2015). Die Thiessen-Methode wird verwendet, um Regionen zu suchen, die am nächsten zu einem Punkt aus einer Menge von unregelmässig verteilten Punkten liegen. Dadurch stellt ein Thiessen-Polygon eine Fläche um einen Punkt dar, in der jede Raumstelle näher an diesem Punkt liegt als an irgendeinem anderen Punkt (GITTA, 2015). Die Kante eines Thiessen-Polygons bildet somit jeweils den geometrischen Ort aller Raumstellen, die von zwei Punkten gleich weit entfernt liegen. Aus diesem Grund können die Kanten der Polygone als Mittelsenkrechten auf die Verbindungslinie zwischen jeweils zwei Punkten gebildet werden. Die Schnittpunkte der verschiedenen Mittelsenkrechten ergeben die Eckpunkte

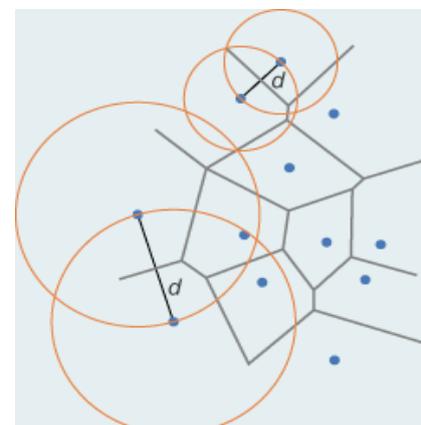


Abbildung 9: Konstruktion von Thiessen-Polygonen (Haggett et al., 1977): Verbindungslinie (d).

eines Thiessen-Polygons (Abb. 10) (GITTA, 2015). Die Thiessen-Methode ist ein weit verbreitetes Interpolationsverfahren und lässt sich insbesondere sinnvoll bei unregelmässiger Verteilung der Messstationen anwenden. Ausserdem ist es ein einfaches und unkompliziertes Verfahren, welches sich gut für Gebiete ohne Höhenabhängigkeiten eignet (ETH, 2014). Die Methode basiert auf der Idee, dass die an einer Messstation gemessenen Daten jeweils bis zur Mitte der Wegstrecke zur benachbarten Station gültig sind. Jeder Messstation wird die Fläche zugeordnet, die durch die Mittelsenkrechten zwischen je zwei benachbarten Messstationen beziehungsweise durch den Rand des betrachteten Gebietes begrenzt wird (Abb. 10) (ETH, 2014). Die Berechnung der Polygonflächen (Abb. 11) sowie der Flächenanteile der verschiedenen Einzugsgebiete innerhalb eines Polygons wurden in ArcGIS berechnet. Basierend auf den Flächenanteilen wurde der prozentuale Anteil der jeweiligen Messstation für die Berechnung der Temperaturzeitreihe des Teufbachgebiets bestimmt (Gl. 2).

$$Teufbach = Lümpenenbach \times 0.02 + Etterenbach \times 0.43 + Erlenbach \times 0.55 \quad (2)$$

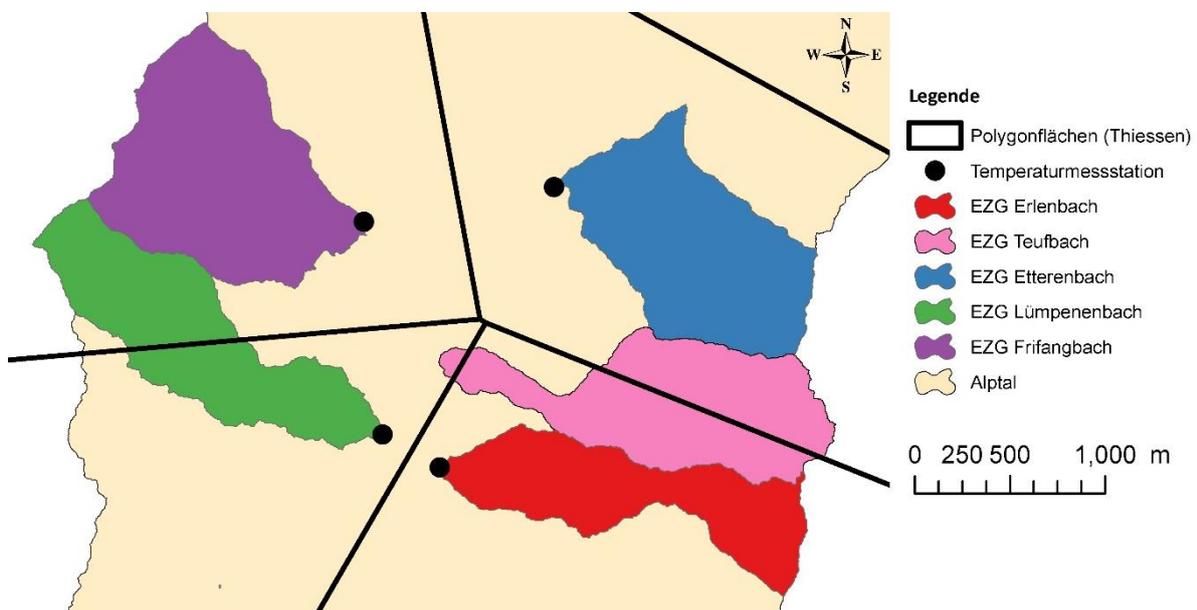


Abbildung 10: Polygonflächen (Thiessen) für die Berechnung der Lufttemperaturen des Teufbachgebiets (ArcGIS).

3.2.3 Niederschlagsdaten

Für die Kalibrierung beziehungsweise Modellierung des Abflusses mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV wird der Gebietsniederschlag [mm d^{-1}] benötigt. Die Inter- und Extrapolation der Zeitreihen der verschiedenen Messstationen erfolgte mittels der multiplen linearen Regression. Die Niederschlagszeitreihen für die Stationen VOG A und VOG B im Vogelbachgebiet sind bereits vollständig. Die anderen wurden gemäss dem Beispiel der Lufttemperaturdaten des Lümpenenbachgebiets komplettiert (Kap. 3.2.1). Welche Zeitreihen für welche Jahre und Einzugsgebiete genutzt wurden, ist im Anhang ersichtlich (Anhang B). Nach der Komplettierung der Niederschlagszeitreihen erfolgte die Berechnung der Gebietsniederschläge anhand der Thiessen-Polygon-Methode (Kap. 3.2.1.1).

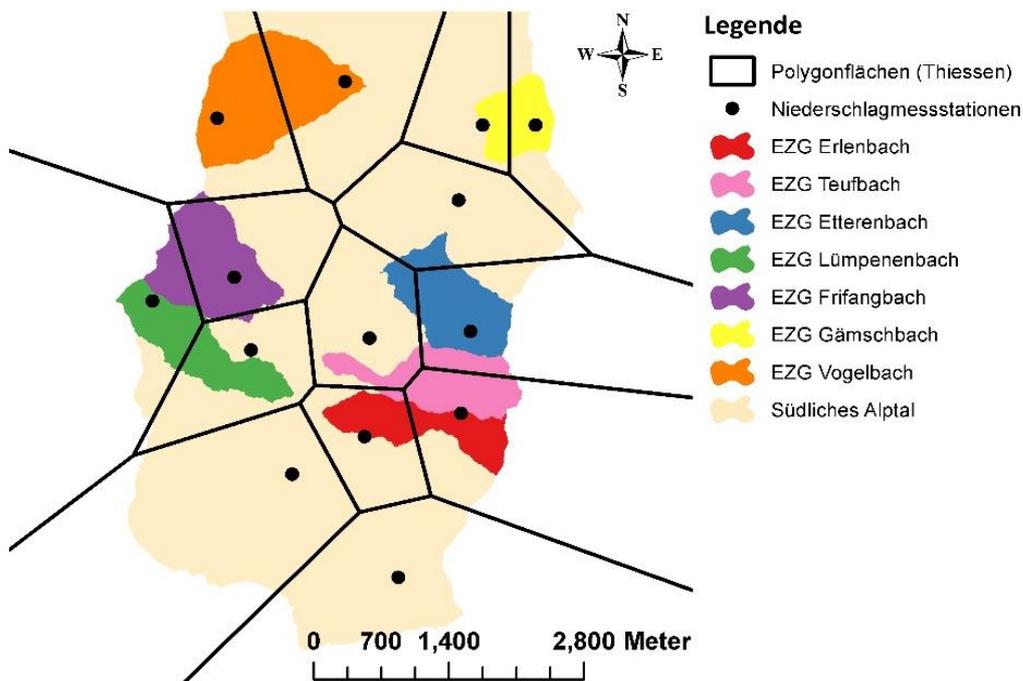


Abbildung 11: Polygonflächen (Thiessen) für die Berechnung der Gebietsniederschläge sowie die Niederschlagsmessstationen und untersuchten Einzugsgebiete (ArcGIS).

Analog zur Berechnung der Lufttemperatur des Teufbachs (Kap. 3.2.1) wurden die Gebietsniederschläge der sieben untersuchten Einzugsgebiete berechnet (Tab. 17). Die Messstationen ZWA A und ZWA B im Zwäckentobel und ihre Datensätze wurden für die Berechnung der Gebietsniederschläge nicht verwendet, da die Niederschlagsmessgeräte des Zwäckens zu weit weg von den anderen Einzugsgebieten im südlichen Alptal liegen.

Tabelle 17: Aus den Polygonflächen (Thiessen) resultierender prozentualer Anteil, welcher für die Berechnung der Gebietsniederschläge relevant waren.

Messstationen	Einzugsgebiet						
	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
VOG A	61 %	-	1 %	-	-	-	-
VOG B	39 %	-	-	-	-	-	-
LUM A	-	48 %	21 %	-	-	-	-
LUM B	-	51 %	2 %	-	-	-	-
FRI B	-	1 %	76 %	-	-	-	-
BUZ B	-	-	-	-	12 %	-	-
GAM A	-	-	-	63 %	-	-	-
GAM B	-	-	-	37 %	-	-	-
ETT A	-	-	-	-	75 %	-	22 %
ETT B	-	-	-	-	13 %	-	26 %
ZWA A	-	-	-	-	-	-	-
ZWA B	-	-	-	-	-	-	-
ERL A	-	-	-	-	-	51 %	52 %
ERL B	-	-	-	-	-	49 %	-

3. 3 Modellerte Daten

Nach der Komplettierung der Luft- und Niederschlagsdatensätze anhand von Regressionsbeziehungen erfolgt die Kalibrierung und zu einem späteren Zeitpunkt die Simulation der Abflussdaten der sieben untersuchten Einzugsgebiete mit Hilfe des HBV-Modells.

3.3.1 HBV-Modell und seine Modellstruktur

Das HBV-Modell (Bergström, 1973) ist ein konzeptionelles hydrologisches Einzugsgebietsmodell, das in über 30 Ländern in allen Skalenbereichen (< 1 km² bis 1.6 Mio. km²), für tägliche Abflusssimulationen angewendet wird (Bergström et al., 2002). Die Eingabedaten beschränken sich auf Tagesniederschläge, Lufttemperaturdaten sowie monatliche Schätzungen der potentiellen Evaporation (Bergström, 1992; Lindström et al., 1997). Entsprechend dem Grad der räumlichen Auflösung handelt es sich um ein semigegliedertes Niederschlag-Abfluss-Modell. Das HBV-Modell ist modular aus den Komponenten Schnee-, Boden-, Grundwasser- und Wellenablaufoutine und ihren Parametern aufgebaut (Bergström, 1995). Die Routinen beinhalten die Schneeeakkumulation und Schneeschmelze durch die Grad-Tag-Methode, die Grundwasserneubildung, die tatsächliche Evaporation als eine Funktion der aktuellen Wasserspeicherfähigkeit im Boden, das Grundwasser durch drei lineare Speichergleichungen und die Wellenablaufoutine durch eine dreieckige Gewichtsfunktion (Abb. 13) (Bergström, 1992, 1995; Harlin und Kung, 1992; Seibert, 1997, 1998). Eine genauere Beschreibung der Modellstruktur des HBV befindet sich im Anhang C oder ist in Lindström et al. (1997), Seibert (2005), Seibert und Vis (2012) zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Modellversion HBV-light-GUI 4.0.0.9 (Seibert und Vis, 2012) verwendet, deren Grundgleichung der Version HBV-6 entspricht (Bergström, 1992; Seibert, 2000, 2005). Ein Nachteil dieses *grey-box* Modells (Schulze, 1998) ist, dass die Modellparameter teilweise keinen direkt messbaren physikalischen Bezug haben (Blackie und Eeles, 1985). Die Vorteile des HBV-

Modells sind die relativ einfache Struktur, die vielseitige Einsetzbarkeit und der geringe Bedarf an Parametern und Eingabedaten (Beven, 1989). Wie bereits erwähnt ist die Anzahl der zu kalibrierenden Parameter relativ gering, aber dennoch gross genug um Anpassungen des Modells an unterschiedliche Einzugsgebiete und hydrologische Bedingungen zu ermöglichen (Bergström, 1995). Die Version HBV-light weist zudem eine einfach Struktur und eine hohe Benutzerfreundlichkeit auf und wurde bereits für unterschiedliche Forschungsprojekte genutzt (Konz und Seibert, 2010; Seibert und Beven, 2009).

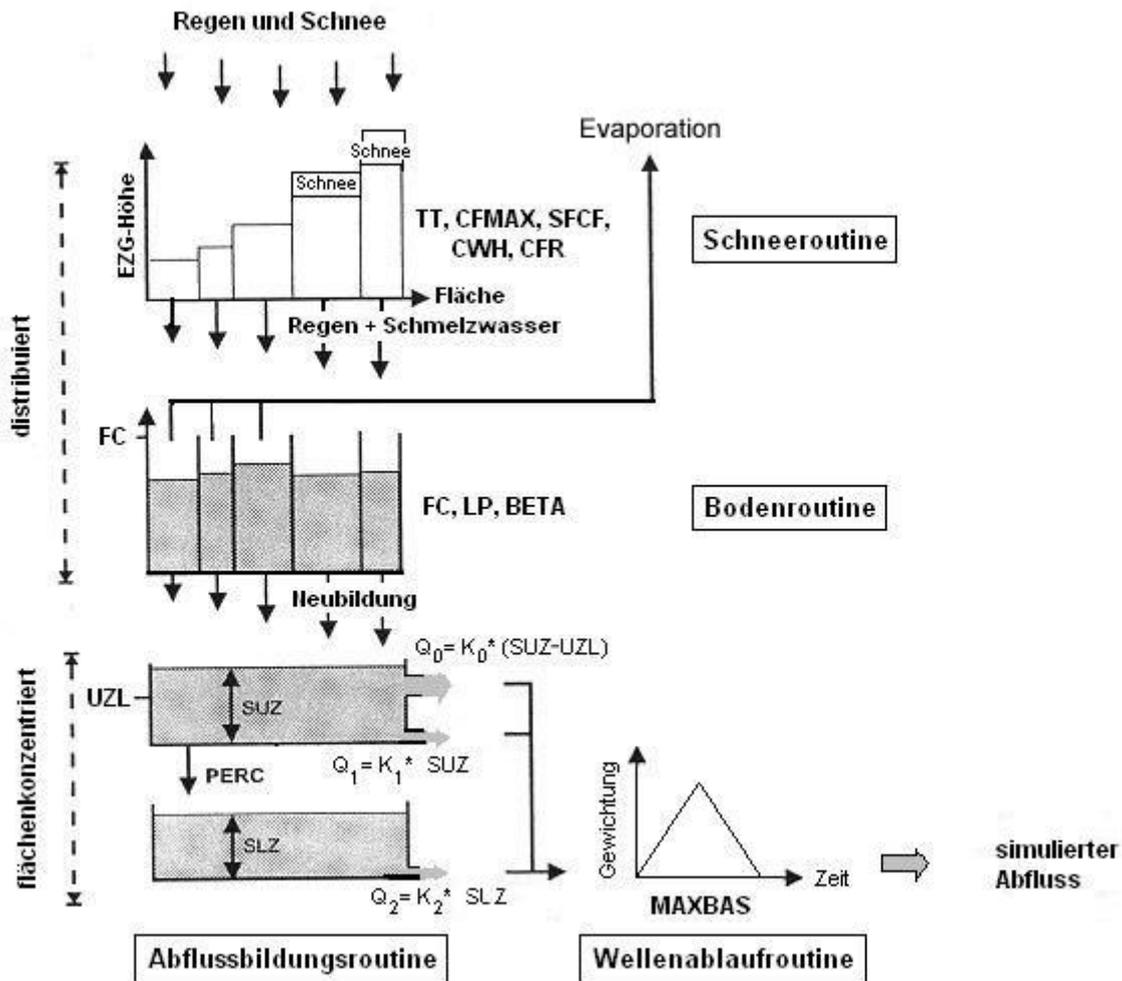


Abbildung 12: Schematische Struktur des HBV-Modells (modifiziert nach Seibert, 1999).

3.3.2 Eingabedaten

Das HBV-Modell benötigt verschiedene Eingabedaten, die jeweils in einem festgeschriebenen Format vorliegen müssen. In den folgenden Abschnitten wird auf die Eingabedateien und die Anforderungen an die Daten eingegangen.

Als Basisdatei für die Modellierung mit dem HBV-Modell wird die Niederschlag-Lufttemperatur-Abfluss Datei bezeichnet, welche aus den inter- und extrapolierten Niederschlags- und Temperaturdaten sowie den originalen Abflussdaten besteht (Kap. 3.1 und 3.2). Zusätzlich wird für die Simulation der Abflussdaten eine Evaporationsdatei benötigt. Diese beinhaltet zwölf langzeitliche Monatsmittelwerte (potentielle Evaporation [mm d^{-1}]), welche das Modell für die täglichen Werte interpoliert (Seibert,

2005). Die quantitative Bestimmung der Evaporation ist eine der schwierigsten Angelegenheiten in der Hydrologie (Koch, 2003). Die direkte Messung der potentiellen Evaporation ist mit erheblichem technischem und finanziellem Aufwand verbunden. Bedeutend einfacher ist die Ermittlung durch physikalisch fundierte Formeln, oder heuristisch abgeleitete, vereinfachte, empirische Formeln, welche auf den Grundlagen von Klimamessungen beruhen (Koch, 2003; Zenker, 2003). Der grosse Vorteil solcher Verfahren liegt darin, dass mit geringen Mess- oder Rechenaufwand Schätzwerte der Evaporation ermittelt werden können. Der Nachteil dieser empirischen Verfahren besteht darin, dass nur Annäherungen an die exakte potentielle Evaporation berechnet werden und komplexere physikalische Vorgänge nicht berücksichtigt werden können (Zenker, 2003). Methodenvergleiche zwischen unterschiedlichen empirischen Verfahren werden unter anderem in den Veröffentlichungen von Allen et al. (1986), Roth (1992) und Beyazgül et al. (2000) vorgestellt.

Eine Auswahl aus dem breiten Spektrum der Verdunstungsformeln wird in der Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Messgrössen zur Berechnung der potentiellen Verdunstung (Zeitintervall: M= Monat, T=Tag, S= Stunde) (aus Spreafico und Weingartner, 2005).

	Thornthwaite (1948)	Penman (1948)	Haude (1958)	Turc (1961)	Primault (1962)	Penman-Monteith (Monteith, 1981)
Temperatur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Strahlung		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Luftfeuchte		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Weitere		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
Zeitintervall	M	S	T	T	> 5T	S

Da keine Messungen mit Evaporimetern für die gesuchte Zeitperiode im südlichen Alptal durchgeführt wurden, wurden für die Modellierung die monatlichen Verdunstungswerte von Maria Staudinger verwendet, welche sie zu einem früheren Zeitpunkt mit Penman (1948) berechnet hatte. Durch Vergleiche der 12 Evaporationswerte mit den Werten von Burch (1994) und den Daten aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz war rasch klar, dass es zu Fehler oder Ungenauigkeiten gekommen ist. Aus diesem Grund hat Benjamin Fischer aus den Daten der MeteoSchweiz von der Messstation Einsiedeln von 1971 bis 1984 und den Temperaturdaten desjeweiligen Einzugsgebiets mit der Penman-Kombinations-Methode die 12 Evaporationswerte neu geschätzt.

3.3.2.1 Kombinationsverfahren nach Penman

Der halbempirische, physikalisch begründete Ansatz von Penman (1948) verknüpft das Energiehaushaltsverfahren und das aerodynamische Verfahren zur Berechnung der potentiellen Evaporation. Der Ansatz wurde ursprünglich für die Evaporation von freien Wasserflächen und kurzen Grasdecken entwickelt. Dieser empirische Ansatz stellt eine der ausgereiftesten physikalisch begründeten Methoden dar, welche mittlerweile eine weite Verbreitung gefunden hat und Grundlage vieler weiterer Ansätze darstellt (Zenker, 2003). Das Verfahren wird oft angewendet, weil es meteorologische Routinemessdaten verwendet und an unterschiedliche Bedingungen (Vegetation, Wasser- und Schneeflächen) an-

gepasst werden kann. Entsprechend können das Absorptionsvermögen, die Windfunktion als Äquivalent für den Stofftransport oder die Berechnung der kurzwelligen Strahlungsbilanz gemäss dem Stand der Forschung berücksichtigt werden (Koch, 2003). Allen (1986) zeigte in seiner Abhandlung die Bandbreite des Verfahrens und die Vielfalt der Variationen auf, indem er zehn Varianten miteinander vergleicht. Der ursprüngliche Ansatz (Gl. 3) ist wie folgt:

$$E_p = \frac{s}{s+\gamma} \times \frac{R_n - G}{L} + \frac{\gamma}{\gamma+s} \times f(v) \times (e_s(T) - e) \quad (3)$$

E_p : Potentielle Evaporation [mm d^{-1}], s : Steigung der Sättigungsdampfcurve [hPa K^{-1}], γ : Psychrometerkonstante [hPa K^{-1}], R_n : Strahlungsbilanz [W m^{-2}], G : Bodenwärmestrom [W m^{-2}], L : spezifische Verdunstungswärme für 1 mm Verdunstungshöhe [W m^{-2}], $f(v)$: von Windgeschwindigkeit und Bewuchshöhe abhängige Funktion [m s^{-1}], $(e_s(T) - e)$: Sättigungsdefizit, abhängig von der Lufttemperatur T und Dampfdruck e [hPa] (Schöniger und Dietrich, 2014).

Trotz der komplexen physikalischen Hintergründe waren für die Berechnung der 12 Verdunstungswerte im Alptal ausschliesslich die folgenden Parameter entscheidend:

- Lufttemperatur 2 m über Boden; Tagesmittel [$^{\circ}\text{C}$]
- Relative Luftfeuchtigkeit 2 m über Boden; Tagesmittel [%]
- Sonnenscheindauer; Tagessumme [h]
- Windgeschwindigkeit; Tagesmittel [km h^{-1}]

Bei der Berechnung der mittleren monatlichen potentiellen Evaporationen, handelte es sich um eine starke Vereinfachung der Realität, welche aber für die Modellierung im HBV-Modell ausreichend war.

Das HBV-Modell beinhaltet neben der Evaporationsdatei eine Präzisierung, in welcher die ermittelten Evaporationswerte entsprechend den aktuellen Tagestemperaturen korrigiert werden können (Gl. 4).

$$(t) = (1 + C_{et}(T(t) - T_M))E_{p,M} \quad (4)$$

dabei gilt: $2E_{p,M} \geq E_p(t) \geq 0$

E_p : Potentielle Evaporation [mm d^{-1}], $E_{p,M}$: Langfristiger Evaporationsmittelwert für den Tag im Jahr [mm d^{-1}], $T(t)$: Temperatur am Tag t [$^{\circ}\text{C}$], T_M : Langfristiger Temperaturmittelwert für den Tag im Jahr [$^{\circ}\text{C}$], C_{et} : Korrekturfaktor [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Lindström und Bergström, 1992).

Bei dieser aus der Formel resultierenden Datei handelte es sich wie bei der Evaporationsdatei um 12 Langzeitmonatsmittelwerte, welche sich aus den täglichen Temperaturdaten der untersuchten Einzugsgebieten ergeben (Seibert, 2005).

Neben den Eingabedateien erlaubte das HBV-Modell durch die Definition von Höhenstufen die Einzugsgebiete realitätsnah abzubilden. Für jede Höhenstufe wurde ein prozentualer Anteil an der Gesamtfläche des untersuchten Gebiets festgelegt, welche in die Modellrechnung einfließt (Seibert, 2005). Im südlichen Alptal, wo sich die Einzugsgebiete meist vertikal über mehrerer hundert Meter Höhe erstrecken, ergab solch eine Unterteilung durchaus Sinn. Die Berechnung der Höhenstufen erfolgte mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells (DHM) in ArcGIS. Die Unterteilung der Einzugsgebiete erfolgte in 9 bis 12 Höhenklassen, welche sich von 1050 bis zu 1700 m ü. M. erstrecken und in 50 m Schritten unterteilt sind.

3.3.3 Modellkalibrierung

Die Kalibrierung eines Modells ermöglicht eine Reduzierung der Parameterunsicherheit und damit der Unsicherheit in Simulationsergebnissen (Eckhard, 2002). Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten eine Parameterkalibrierung vorzunehmen. Eine Variante ist die manuelle Kalibrierung der Parameter durch Expertenwissen und /oder durch die Versuch-und-Irrtum-Methode und anschliessendem Anpassen der Werte bis sich das Resultat nicht mehr verbessert. Es handelt sich um ein iteratives Verfahren, welches so lange andauert bis ein optimaler Parametersatz gefunden wurde, der eine hohe Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Abflüssen erreicht. Die Vorteile der direkten Kontrolle über die Modellkalibrierung ist gegeben, allerdings ist diese Methode sehr zeitaufwändig und die Resultate können subjektiv sein (Seibert, 2000). Aus diesen Gründen stehen die automatischen Kalibrierungsmethoden, welche speziell für das HBV-Modell in Norwegen und Schweden entwickelt wurden, im Vordergrund dieser Arbeit bei der Generierung von objektiven Resultaten (SMHI, 1996; Zhang und Lindström, 1997; Seibert, 2000). Diese sogenannten evolutionsbasierten Methoden sind nützliche Werkzeuge für die Optimierung von konzeptionellen Abflussmodellen (Wang, 1991; Franchini, 1996; Kuczera, 1997). Genetische Algorithmen sind eine weit verbreitete Klasse dieser Methoden, welche als *Genetic Algorithm and Powell Optimization* (GAP-Optimierung) im HBV-Modell implementiert ist (Seibert, 2000). Die Idee der genetischen Algorithmen entstand ursprünglich von Holland (1975), und imitiert das Konzept der Evolution (Seibert, 2000). Genetische Algorithmen sind unter gewissen Voraussetzungen in der Lage, komplexe Optimierungsprobleme zu behandeln und aus einer sehr grossen Zahl von möglichen Lösungen die beste im Sinne eines Gütemasses zu ermitteln. Nach dem Vorbild der natürlichen Selektion werden dabei Lösungskandidaten hoher Güte zur Erzeugung neuer Kandidaten bevorzugt, in der Erwartung, schrittweise zu noch besseren Lösungen zu gelangen (Buttelmann und Lohmann, 2004). Die Optimierungsfunktion gemäss Powell dient zum Schluss noch der Feinabstimmung bei der Suche nach dem lokalen Optimum (Seibert, 2000). Mit Hilfe der GAP-Optimierungs-Methode wurden 5000 Modell-Durchläufe mit 1000 Powell-Durchläufe und 100facher Kalibrierung pro Einzugsgebiet gemacht. Bei den restlichen Einstellungen wurden die standardisierten Werte des HBV-Modells belassen. Die Rechenzeit für ein Einzugsgebiet mit diesen Einstellungen betrug einen Tag und konnte durch die Verringerung der Anzahl Kalibrierungen stark verkürzt werden. Jedoch kann in diesem Fall das Problem der Äquifinalität auftreten, welches Beven (2006) beschreibt. Das Problem liegt darin, dass verschiedene Parametersätze zu ähnlichen Resultaten führen können. Es kann durchaus vorkommen, dass einzelne Parameter ganz verschiedene Werte annehmen und das Gesamtergebnis jedoch dasselbe ist. Somit läuft man Gefahr eine gute Kalibrierung mit unplausiblen Parameterkonstellationen zu erreichen (Beven, 2006). Um die Gefahr der Äquifinalität möglichst klein zu halten, wurden in dieser Arbeit 100 Kalibrierungsvorgänge durchgeführt. Es ergaben sich somit pro Einzugsgebiet 100 Optima, welche für weitere Analysen genutzt werden konnten.

In den Modelleinstellungen des HBV-light ist eine Aufwärmperiode implementiert, welche notwendig war um geeignete Anfangswerte der verschiedenen Zustandsgrössen für den Start des Simulationszeitraums zu erhalten. Die Simulation der Aufwärmperiode wurde weder gespeichert noch für weitere Analysen verwendet. Für die Kalibrierung wurde eine Aufwärmperiode von zwei Jahren gewählt, somit sollten sich geeignete Startwerte bezüglich den meteorologischen Bedingungen sowie der Speicher und Parameterwerte beim Start der Simulation festgelegt haben (Seibert, 2005; Seibert und Vis, 2012).

Für drei der sieben Einzugsgebiete wurden unterschiedlich lange Kalibrierungsperioden verglichen, um bestmögliche Übereinstimmungen zwischen simulierten und beobachteten Abflusszeitreihen zu erhalten. Die besten Resultate für die Simulation der Abflussdaten von 1968 bis 1984 erhielt man mit einer

Kalibrierungsperiode für denselben Zeitraum. Waren keine Abflusswerte vorhanden, wurde die Datenlücke durch den Wert -999 ersetzt. Je länger die Kalibrierungsperiode war, desto besser war die Modelleffizienz und desto geringer war die mittlere Differenz zwischen den simulierten und beobachteten Abflüssen.

3.3.4 Wahl der Modellstruktur

Die Grundstruktur des HBV-Modells (Abb. 13) kann in sieben unterschiedliche Modellstrukturen gegliedert werden (Tab. 19). Im Wesentlichen unterscheiden sich diese durch eine unterschiedliche Anzahl der Grundwasserkästen oder deren Eigenschaften (Seibert, 2005). Die genauen Unterschiede und Erklärungen sind in der HBV-light Hilfe der Version HBV-light-GUI 4.0.0.9 ersichtlich. Für drei der sieben untersuchten Einzugsgebiete wurden Test-Kalibrierungen durchgeführt um herauszufinden, welche Modellstruktur für das jeweilige Einzugsgebiet am besten geeignet ist (Tab. 19).

Tabelle 19: Vergleich unterschiedlicher Modellstrukturen der Gebiete Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach anhand der Modelleffizienz (ME), wobei 1 eine perfekte und $-\infty$ eine schlechte Übereinstimmung zwischen der simulierten und beobachteten Abflussdaten darstellt, sowie der mittleren Differenz (MD): verteilt (vt.), Grundwasser (GW).

Modellstruktur	VOG		LUM		ERL	
	ME [-]	MD [mm a ⁻¹]	ME [-]	MD [mm a ⁻¹]	ME [-]	MD [mm a ⁻¹]
Standard	0.636	83	0.659	283	0.777	85
Vt. SUZ	0.645	67	0.657	303	0.779	0
vt. Schneeroutine	0.625	74	0.660	304	0.772	101
Ein GW-Kasten	0.639	148	0.659	273	0.778	160
Drei GW-Kästen	0.632	47	0.655	304	0.766	88
Drei GW-Kästen (vt. STZ)	0.629	85	0.645	303	0.770	131
Drei GW-Kästen (vt. STZ, SUZ)	0.624	16	0.654	302	0.771	72

Aus der Tabelle 19 ist gut ersichtlich, dass neben dem Standard-Modell auch andere Strukturen gute Resultate erzielten. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Strukturen sind relativ gering, dennoch wären das verteilte SUZ Modell oder diejenige mit nur einem Grundwasserkasten eine vielversprechende Alternative gewesen. In Absprache mit den Betreuern hat man sich für die standardisierte Modellstruktur (Abb. 14) entschieden und diese für eine gute Vergleichbarkeit auf alle Einzugsgebiete angewandt.

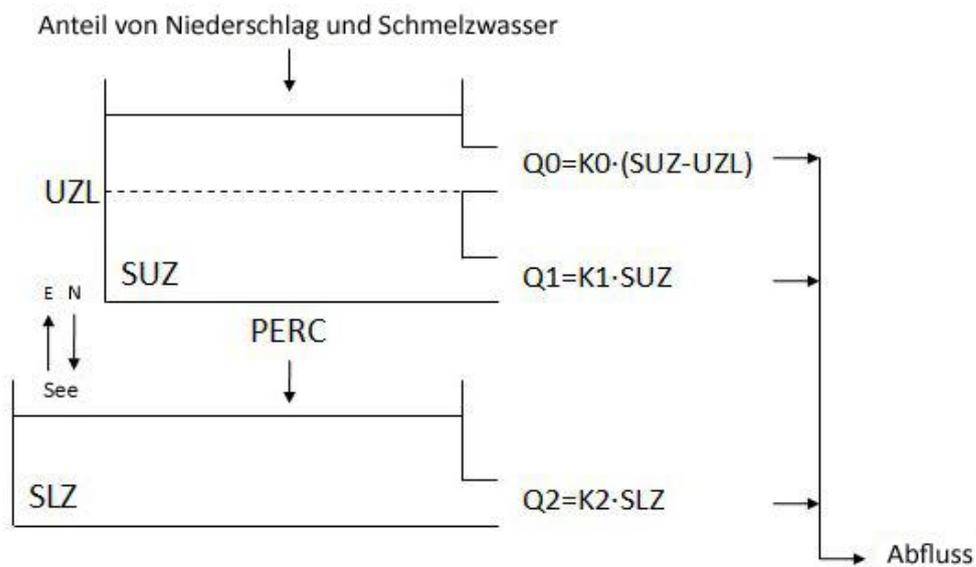


Abbildung 13: Standardisierte Modellstruktur des HBV-Modells (modifiziert nach HBV-light Hilfe 4.0.0.9).

3.2.8 Parameterwahl

Nicht nur die Wahl der Modellstruktur sondern auch die richtige Parameterwahl ist für eine gute Modellierung ausschlaggebend. Bei den Einstellungen zur Kalibrierung anhand der GAP-Optimierung lassen sich Grenzwerte definieren, um eine gute Modellgüte mit unergründbaren Parameterwerten auszuschliessen. Die Spannweiten zwischen den Grenzwerten wurden für die Kalibrierung grosszügig gewählt, um ein möglichst hohes Mass an Übereinstimmung zwischen den simulierten und beobachteten Abflusszeitreihen zu erhalten (Tab. 20). Die Grenzwerte wurden aus einer Kombination von Expertenwissen, Literatur (Seibert, 1997; Uhlenbrook et al., 1999) und Testdurchgängen festgelegt.

Tabelle 20: Übersicht über die Parameter des HBV-Modells und ihren Grenzwerten für die Kalibrierung im HBV-Modell.

Parameter	Erklärung	Einheit	Min.	Max.
Schneeroutine				
TT	Schwellenwert Temperatur	°C	-2	1
CFMAX	Grad-Tag-Faktor	mm °C ⁻¹ d ⁻¹	0.5	7.5
SFCF	Schneefall-Korrektur-Faktor	-	0.5	1
CWH	Wasserrückhaltevermögen	-	0.05	0.05
CFR	Wiedergefrierungs-Koeffizient		0.1	0.1
Bodenroutine				
FC	Maximale Bodenfeuchte	mm	100	1000
LP	SM Schwellenwert für die Reduktion der E	-	0.3	1
BETA	Form-Koeffizient	-	0.5	8
C _{et}	Korrekturfaktor für E _p	°C ⁻¹	0	0.5
Grundwasserroutine				
K0	Rezessionskoeffizient	d ⁻¹	0.1	0.9
K1	Rezessionskoeffizient	d ⁻¹	0.01	0.5
K2	Rezessionskoeffizient	d ⁻¹	0.000 05	0.3
UZL	Schwellenwert für den K ₀ -Ausfluss	mm	0	90
PERC	Max. Fluss von der oberen in die untere GW-Box	mm d ⁻¹	0	9
Wellenablaufroutine				
MAXBAS	Glättung durch Gewichtsfunktion	d	1	5
PCALT	Höhenabhängigkeit des Niederschlags	% / 100 m	10	10
TCALT	Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur	°C / 100 m	0.6	0.6

3.2.9 Modellgüte

Für den anschliessenden quantitativen Vergleich zwischen den simulierten und beobachteten Abflüssen existieren zahlreiche Gütemasse (Effizienzmasse). Die am häufigsten verwendete statistische Modelleffizienz (R_{eff}) in Niederschlag-Abfluss-Modellen ist diejenige nach Nash und Sutcliffe (1970) (Gl. 5).

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{sim}(t) - Q_{Obs}(t))^2}{\sum(Q_{Obs}(t) - \bar{Q}_{Obs}(t))^2} \quad (5)$$

Dieses Gütemass ist ebenfalls im HBV-Modell enthalten und wird dort standardmässig zur Überprüfung der Modellgüte verwendet (Seibert, 2005). Der Wertebereich der dimensionslosen Modelleffizienz (R_{eff}) liegt zwischen $-\infty$ und 1. Ein Wert von 1 entspricht einer perfekten und ein negativer Wert einer sehr schlechten Übereinstimmung zwischen den simulierten und beobachteten Abflusszeitreihen. Das Optimum von 1 wird bei einer kontinuierlichen Simulation über mehrere Jahre zwar angestrebt, aber nie erreicht. Eine Effizienz von 0 heisst, dass das Modell kein besseres Ergebnis liefert, als wenn die Mittelwerte von allen Messwerten für jeden Zeitschritt anstelle der simulierten Werte berücksichtigt würden (Beven, 2012). Da in die Berechnung von R_{eff} der quadratische Fehler zwischen

simulierter und beobachteter Grösse eingeht, werden Spitzenabflüsse besonders stark berücksichtigt. Aus diesem Grund werden für Aussagen über die Güte simulierter Niedrigwasserabflüsse oftmals die logarithmierte Modelleffizienz ($\log R_{eff}$) berechnet, bei der alle Werte logarithmisch transformiert werden (Uhlenbrook et al., 1999).

In Realität resultiert die Optimierung mit R_{eff} in einem andauernden Volumenfehler (Lindström, 1997; Romanowicz et al., 2013). Für die Masterarbeit wurde somit das Gütemassive Lindström (Gl. 6) verwendet, welches ein Kompromiss zwischen der Effizienz nach Nash-Sutcliffe und derjenigen des relativen Volumenfehlers ist. Mit dieser Variante erzielt man meist sehr hohe R_{eff} -Werte und praktisch kein Volumenfehler, was für die Modellierung der Abflüsse erfolgsversprechend scheint (Lindström, 1997; Romanowicz et al., 2013).

$$LindströmMeasure = R_{eff} - 0.1 \frac{|\sum(Q_{Obs} - Q_{sim})|}{\sum(Q_{Obs})} \quad (6)$$

4. Resultate

Im ersten Teil der Resultate sind Vergleiche der originalen Zeitreihen der untersuchten Einzugsgebiete anhand statistischer Analysen und graphischer Darstellungen ersichtlich. Im Kapitel 4.2 folgt die Analyse der inter- und extrapolierten Lufttemperatur- und Niederschlagszeitserien. Ausserdem wird auf die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den originalen und inter- und extrapolierten Zeitreihen hingewiesen. Zum Schluss folgen noch die Resultate der Modellierung der Abflussdaten mit dem HBV-Modell und wiederum ein Vergleich mit den originalen Daten.

4.1 Originale Zeitreihen

4.1.1 Temperaturdaten

In der Abbildung 14 sind die Jahresmittelwerte der Lufttemperaturdaten aller untersuchten Einzugsgebiete ausser demjenigen des Teufbachs (Kap. 3.1.1) dargestellt, da für das Gebiet des Teufbachs keine Temperaturdaten vorhanden sind. Für die zwei Zeitreihen des Vogelbach- und des Lämpenenbachgebiets sind jeweils Trendlinien eingefügt um den Trend während der gesamten Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 zu visualisieren.

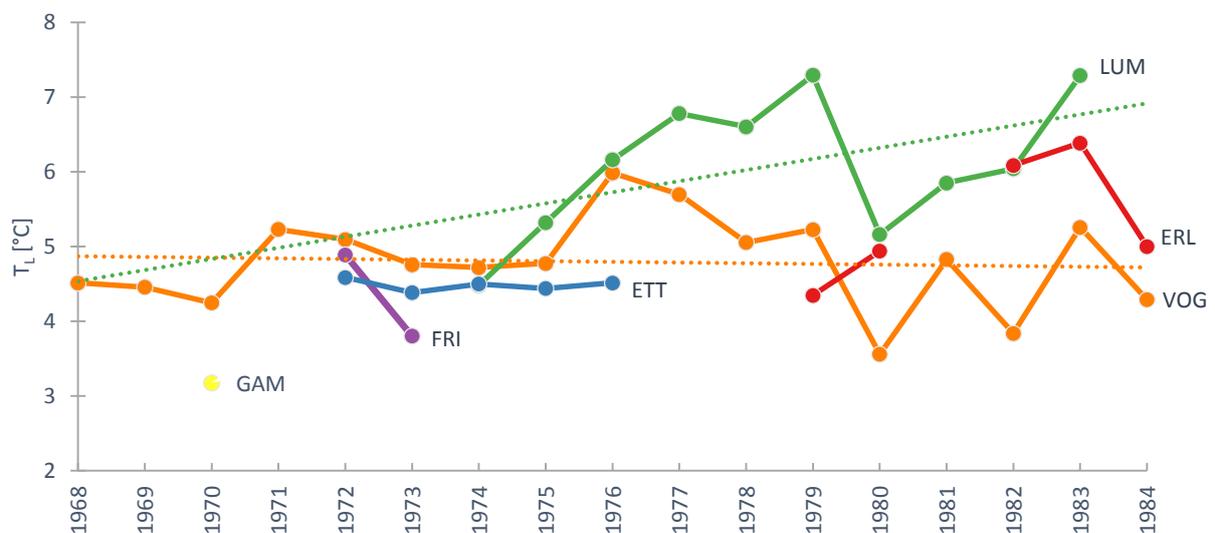


Abbildung 14: Jahresmittelwerte der originalen Lufttemperaturzeitreihen der untersuchten Einzugsgebiete von 1968 bis 1984 sowie Trendlinien der Gebiete des Vogel- und des Lämpenenbachs: Lufttemperatur (T_L), Trendlinien (gepunktet).

Die Abbildung 14 zeigt, mit Ausnahme des Datensatzes des Vogelbachgebiets, die lückenhaften Datensätze der Lufttemperaturzeitreihen auf. Aufgrund der geringen Anzahl an Jahresmittelwerten aus dem Gämsch- sowie dem Frifangbachgebiet lassen sich weder Aussagen über deren Temperaturentwicklung im Laufe der Untersuchungsperiode, noch Vergleiche bezüglich der Lufttemperatur mit anderen Gebieten im südlichen Alptal machen. Die Jahresmittelwerte im Etterenbachgebiet sind über die Periode von 1972 bis 1976 sehr konstant bei 4.5 °C. In den Jahren von 1979 bis 1984 sind deutlich grössere Schwankungen in den Jahresmittelwerten auszumachen, wie die Entwicklung der Temperaturzeitreihen zeigt. Die Zeitserien der Gebiete Lämpenen- und Vogelbach sind am längsten und weisen ein unterschiedlicher Temperaturverlauf auf. Die Temperaturwerte des Lämpenenbachgebiets sind ab

1977 um mindestens 1 °C wärmer als die Jahresmittelwerte im Gebiet des Vogelbachs. Dieser Unterschied wird in einem statistischen Test (Runs-Test) als signifikant angegeben. Ausserdem ist anhand der Trendlinien eine positive Tendenz der Lufttemperaturen im Lümpenenbachgebiet auszumachen, welche jedoch nicht signifikant ist. Hingegen ist der nicht signifikante Trend bei der Vogelbachzeitreihe leicht negativ.

Die Abbildung 15 zeigt eine signifikante Zunahme der Lufttemperatur im Sommer und eine nicht signifikante Abnahme im Frühling und Herbst im Einzugsgebiet des Vogelbachs. Im Jahr 1976 und 1983 ereigneten sich hohe durchschnittliche Temperaturwerte im Sommer mit zirka 15 °C. Hohe Werte im Winter wurden in den Jahren 1972, 1974 und 1977 mit durchschnittliche Temperaturen von -0.5 °C gemessen. Sehr kalte Winter ereigneten sich hingegen im Jahr 1969 und 1981. Die tiefsten Lufttemperaturen im Herbst waren im Jahr 1974 erkennbar und die kältesten Frühlingstemperaturen wurden im Jahr 1970 und 1982 gemessen. Die durchschnittlichen Temperaturen im Vogelbachgebiet waren innerhalb der Untersuchungszeitraums im Sommer bei 12.4 °C, im Herbst bei 5.6 °C, im Winter bei -2.1°C und im Frühling bei 3.1 °C.

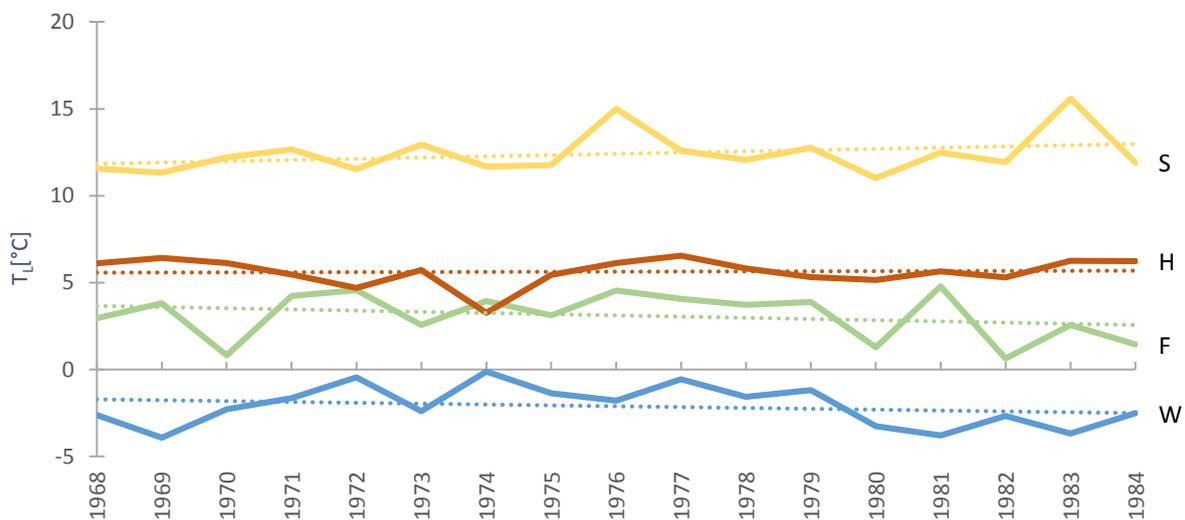


Abbildung 15: Temperaturentwicklung während dem Zeitraum von 1968 bis 1984 im Vogelbachgebiet in Bezug auf die Jahreszeiten sowie die dazugehörigen Trendlinien: Lufttemperatur (T_L), Winter (W), Frühling (F), Sommer (S), Herbst (H), Trendlinien (gepunktet).

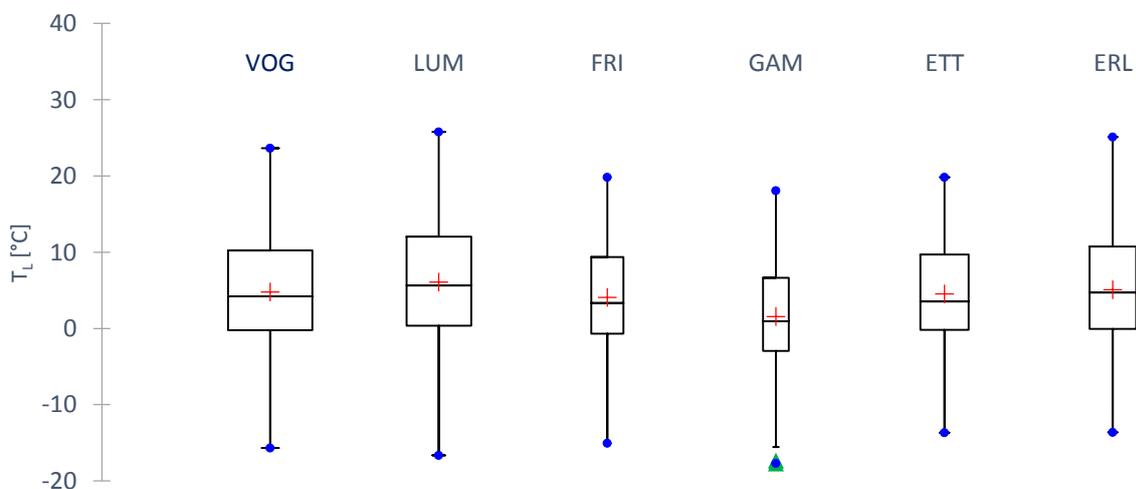


Abbildung 16: Kastendiagramme der originalen Lufttemperaturtageswerte der untersuchten Einzugsgebiete von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L), Mittelwert (Kreuz), Ausreisser (Dreieck), Min/Max (Kreis).

Das Vogelbachgebiet besitzt den breitesten Kasten und hat somit, wie bereits erwähnt, die längste Temperaturzeitreihe (Abb. 16). Im Gegenzug weist das Gämschbachgebiet den dünnsten Kasten und die kleinste Temperaturzeitreihe auf. Die blauen Punkte bilden die Minima beziehungsweise Maxima der einzelnen Einzugsgebiete ab und variieren von -17.7 bis zu 25.8 °C. Der höchste Tageswert aller untersuchten Temperaturdatensätze wurde am 31.07.1983 im Lümpenenbachgebiet festgestellt. Der tiefste Tageswert wurde im Gebiet des Gämschbachs gemessen und war am 06.03.1971. Dieser Datenpunkt ist im Kastendiagramm als Ausreisser definiert, da der Datenwert mehr als 1.5-mal von dem Interquartilsabstand entfernt ist. Der Interquartilsabstand ist der Abstand zwischen dem 1. und dem 3. Quartil (Länge des Kastens) und ein Streuungsmass, da sich 50 % der Daten innerhalb des Kastens befinden. Die Tageswerte der originalen Lufttemperaturdatensätze des Einzugsgebiets des Lümpenenbachs ergeben den grössten Mittelwert sowie die grösste Amplitude. Ebenfalls aus den Kastendiagrammen ersichtlich ist, dass das Gämschbachgebiet die geringste durchschnittliche Tagestemperatur aufweist.

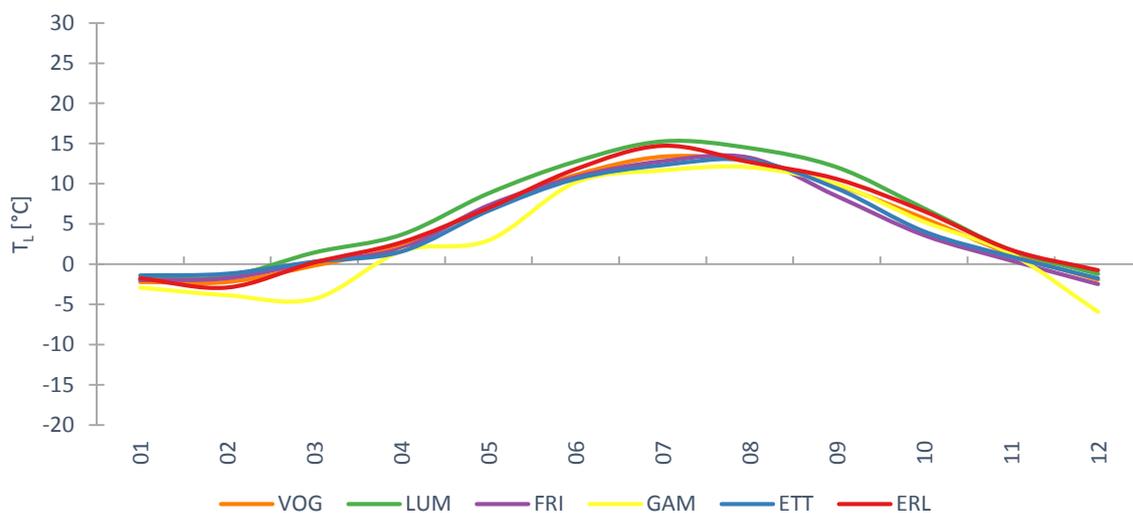


Abbildung 17: Mittlere monatliche Lufttemperaturen der bemessenen Einzugsgebiete über die gesamte Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L).

Der mittlere Verlauf der Temperaturen im Jahresgang (Abb. 17) ist bei allen bemessenen Einzugsgebieten ungefähr identisch mit den höchsten Temperaturen während den Monaten Juli und August und den tiefsten Werten im Dezember, Januar und Februar.

Durch einige statistische Kennzahlen wird eine genauere Betrachtung der Zeitserien ermöglicht (Tab. 21). Die tiefsten Tagestemperaturen liegen zwischen -17.7 und -13.6 °C und wurden während der Periode von Anfang Dezember bis Anfang März gemessen. Die maximalen Temperaturen des Frifang-, Gämsch- und Etterenbachgebiets sind unter 20 °C und daher um einiges geringer als die maximalen Lufttemperaturen des Lümpenen- und Erlenbachgebiets mit Werten über 25 °C im Juli. Der höhere Median und auch der höhere arithmetische Mittelwert weisen auf die grundsätzlich höheren Werte im Erlen- und Lümpenenbachgebiet hin. Das Gämschbachgebiet hat einen sehr tiefen Mittelwert von 1.6 °C. Das Lümpenenbachgebiet besitzt dagegen mit 6.1 °C die höchste durchschnittliche Temperatur und mit 42.4 °C die grösste Amplitude der untersuchten Gebiete. Anhand der Streuungsmasse Varianz, Standardabweichung und Variationskoeffizienten ist erkennbar, dass der Datensatz des Gämschbachgebiets in Bezug auf die Länge der Zeitserie die grösste Streuung aufweist, insbesondere während den Frühlingsmonaten (Abb. 17). Die anderen Einzugsgebiete haben bei den Streuungsmassen sehr ähnliche Werte (Tab. 21).

Tabelle 21: Statistische Kennwerte der gemessenen Tageslufttemperaturdaten im südlichen Alptal von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}), Varianz (σ^2), Standardabweichung (σ), Variationskoeffizient (v).

Variablen	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL
Anz. der Datenwerte	6210	3652	909	577	2038	1884
Maximum [°C]	23.6	25.8	19.9	18.1	19.9	25.1
Datum des Max.	31.07.83	31.07.83	10.08.72	06.08.70	17.08.74	27.07.83
\bar{x} [°C]	4.8	6.1	4.1	1.6	4.5	5.1
Median[°C]	4.2	5.6	3.3	1	3.5	4.7
Minimum [°C]	-15.7	-16.7	-15.1	-17.7	-13.7	-13.6
Datum des Min.	06.03.71	29.01.76	02.12.73	06.03.71	29.01.76	15.01.79
Amplitude [°C]	39.3	42.4	34.9	35.8	33.5	38.7
σ	6.6	7.3	6.5	7	6.2	7
σ^2	44.2	53.5	42	49.2	38.2	49.2
v	1.4	1.2	1.6	4.5	1.4	1.4

Die Ähnlichkeiten der verschiedenen Temperaturzeitreihen sind in der Korrelationsmatrix nach Spearman (Tab. 22) ersichtlich, welche auf einer Rangkorrelation beruht und für nicht normalverteilte Datensätze gut geeignet ist (Bortz, 2005).

Tabelle 22: Korrelationsmatrix der untersuchten Einzugsgebiete nach Spearman.

Variablen	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL
VOG	1	<i>0.981</i>	<i>0.992</i>	<i>0.992</i>	<i>0.988</i>	<i>0.962</i>
LUM	<i>0.981</i>	1	<i>0.983</i>	-	<i>0.982</i>	<i>0.973</i>
FRI	<i>0.992</i>	<i>0.983</i>	1	-	<i>0.987</i>	-
GAM	<i>0.992</i>	-	-	1	-	-
ETT	<i>0.988</i>	<i>0.982</i>	<i>0.987</i>	-	1	-
ERL	<i>0.962</i>	<i>0.973</i>	-	-	-	1

Werte in Kursiv sind von Null verschieden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha=0.05$

Die Tagestemperaturzeitreihen der Gebiete sind allesamt ähnlich zueinander, da sie den Unähnlichkeitsschwellenwert von 0.95 übertreffen (Tab. 22). Eine hohe Korrelation mit einem Wert 0.992 erreichen die zwei Zeitreihen des Vogel- und Frifangbachgebiets sowie die Gebiete des Vogel- und Gämschbaches. Eine ähnliche gute Korrelation weisen die Zeitreihen der Gebiete Vogel- und Etterenbach, sowie das Frifang- und Etterenbachgebiet auf. Die geringsten Korrelationen in Bezug auf die originalen Lufttemperaturzeitreihen haben die Gebiete Lämpenenbach und Erlenbach mit einem Wert von 0.973 und die Gebiete Vogel- und Erlenbach mit einer Korrelation von 0.962. Aufgrund unvollständiger Datensätze lassen sich gewisse Einzugsgebiete nicht miteinander vergleichen, da eine zwingende Überlappung der Datensätze nicht vorhanden ist.

4.1.2 Niederschlagsdaten

In der Abbildung 18 sind alle jährlichen Niederschlagssummen, welche auf dem oberen Höhengniveau (zwischen 1410 und 1470 m ü. M.) gemessen wurden, abgebildet (Tab. 7).

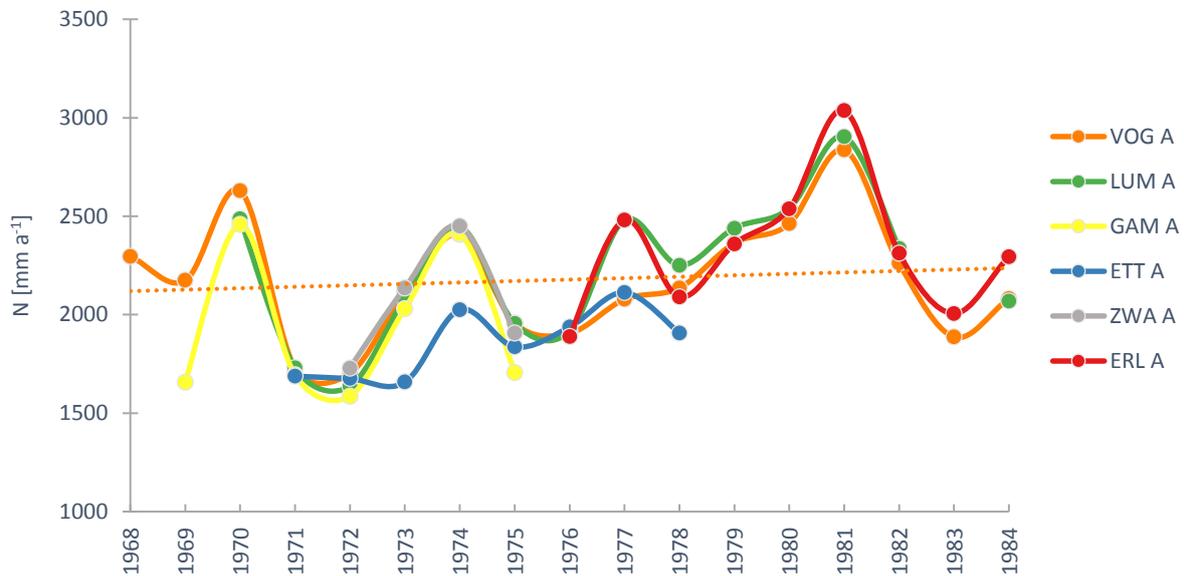


Abbildung 18: Jährliche Niederschlagssummen aller höher gelegenen Messstationen von 1968 bis 1984 sowie die Trendlinie der Jahresniederschlagssummen des Totalisators im Einzugsgebiet des Vogelbachs (VOG A): N (Niederschlag), Trendlinie (gepunktet).

Das Jahr 1981 war die niederschlagsreichste Zeit der Untersuchungsperiode mit einer maximalen Jahresniederschlagsmenge von über 3000 mm a^{-1} im Erlenbachgebiet. Die trockensten Jahre während der Untersuchungsperiode waren 1971 und 1972. Die geringste Niederschlagsmenge fiel im Jahr 1971 mit unter 1600 mm a^{-1} im Gämschbachgebiet. Anhand der linearen Trendlinie der oberen Niederschlagsmessstation im Vogelbachgebiet ist eine leichte positive, aber nicht signifikante Niederschlagszunahme über die Zeitperiode von 1968 bis 1984 ersichtlich. Im Allgemeinen verlaufen die Zeitreihen ähnlich zueinander mit Ausnahme derjenigen der Station vom Etterenbachgebiet. Die Niederschlagssummen im Etterenbachgebiet sind deutlich geringer als die Werte anderer Niederschlagsmessstationen im südlichen Alptal.

Im Alptal wurden im Zeitraum von 1968 bis 1984 durchschnittlich 173 Niederschlagstage pro Jahr ($N \geq 0.5 \text{ mm d}^{-1}$) gezählt. Das Maximum von 204 Tagen im Jahr wurde im Jahr 1981 erreicht. Das Minimum liegt bei 153 Tagen im Jahr 1976. Es zeigt sich ein leicht positiver, aber nicht signifikanter Trend bezüglich der Anzahl Niederschlagstagen im Verlauf der untersuchten Zeitperiode.

In den Abbildungen 19 und 20 werden die jährlichen maximalen, mittleren und minimalen Niederschlagssummen in Bezug auf die Distanz zu Einsiedeln beziehungsweise der Höhe über Meer sowie ihre Trendlinien dargestellt. Anhand dieser Grafiken sind die Beziehungen zwischen der Niederschlagsmenge und der topographischen Lage sowie der Höhe der Messstation ersichtlich.

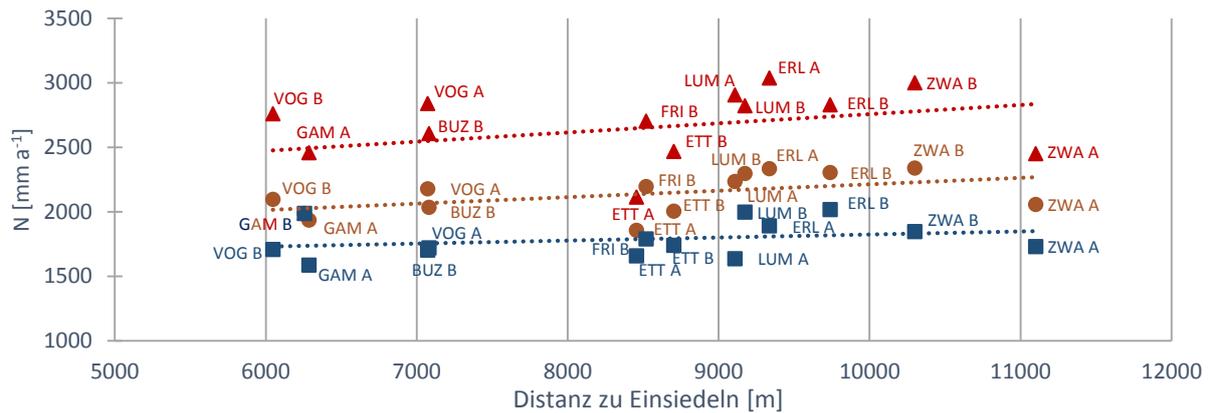


Abbildung 19: Jährliche maximale, mittlere und minimale Niederschlagssummen sowie ihre Trendlinien in Bezug auf die Distanz zu Einsiedeln: Niederschlag (N), Maximalwerte (Dreiecke), Mittelwerte (Kreis), Minimalwerte (Vierecke), Trendlinien (gepunktet).

Anhand der Trendlinien ist gut ersichtlich, dass Niederschlagsmessstationen, welche eine grössere Distanz zum am nördlichen Rand des Alptals liegenden Einsiedeln aufweisen, mehr Niederschlag registrierten (Abb. 19). Die Totalisatoren in den Einzugsgebieten des Vogel- und Gämschbachs haben aus diesem Grund deutlich weniger Niederschlag gemessen als die Gebiete am südlichen Ende des Alptals wie das Zwäckentobel oder das Erlenbachgebiet. Jedoch ist die Zunahme des Niederschlags mit der Distanz zu Einsiedeln nicht signifikant (Abb. 19). Für den Totalisator GAM B im Gämschbachgebiet ist lediglich ein Jahreswert vorhanden, somit ist die maximale, mittlere und minimale Niederschlagssumme mit 1987 mm a^{-1} gleich gross.

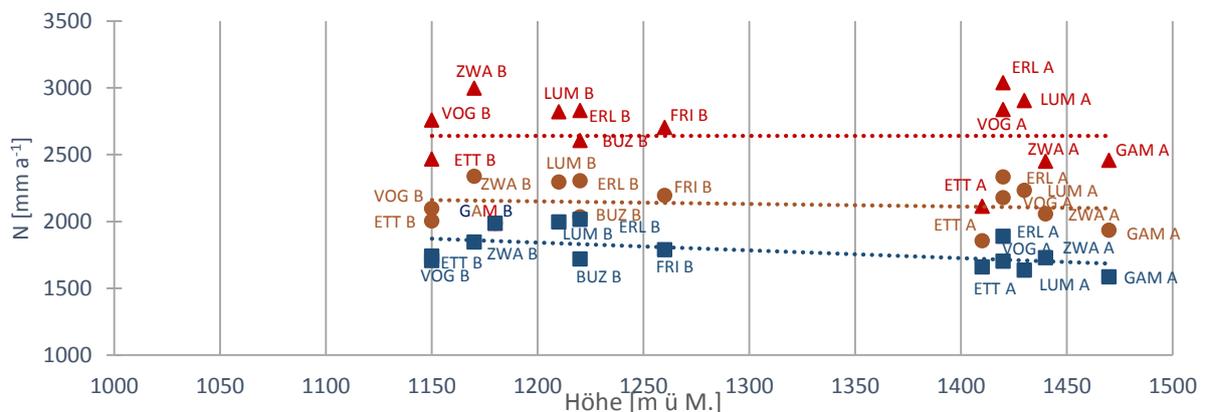


Abbildung 20: Jährliche maximale, mittlere und minimale Niederschlagssummen sowie ihre Trendlinien in Bezug auf die Höhe der Messstationen: Niederschlag (N), Maximalwerte (Dreiecke), Mittelwerte (Kreis), Minimalwerte (Vierecke), Trendlinien (gepunktet).

Die linearen Trendlinien (Abb. 20) zeigen einen leichten, nicht signifikanten Abfall der maximalen, mittleren und minimalen Jahresniederschlagssummen mit Zunahme der Meereshöhe an. Aus diesem Grund erhalten die Messstationen auf dem unteren Messniveau zwischen 1150 bis 1260 m ü. M., grundsätzlich mehr Niederschlag als die Stationen in Höhen von 1410 bis 1470 m ü. M. (Tab. 7). Diese maximalen jährlichen Niederschlagssummen weisen Werte von bis über 3000 mm a^{-1} auf, das sind über 1000 mm a^{-1} mehr als die maximale Niederschlagsmenge im Etterenbachgebiet (ETT A). Die geringste Niederschlagssumme wurde im Gebiet des Gämschbaches festgestellt. Die grösste minimale Niederschlagssumme mit über 2000 mm a^{-1} wurde während der Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 im Erlenbachgebiet verzeichnet (Abb. 20).

Der geringste Mittelwert der jährlichen Niederschlagssummen mit 1855 mm a^{-1} stammt aus dem Einzugsgebiet des Etterenbachs (Tab. 23). Die Daten hierfür wurden durch den Totalisator ETT A in einer

Höhe von 1410 m ü. M. gemessen. Weitere tiefe Niederschlagssummen wurden durch die zwei Messstationen im Gämschbachgebiet registriert. Die grössten mittleren Niederschlagssummen mit Werten um 2300 mm a^{-1} wurden in den südlichen Gebieten des Erlenbach, Zwäcken und Lümpepenbach gemessen.

Tabelle 23: Übersicht über die durchschnittlichen, jährlichen Niederschlagssummen aller Niederschlagsmessstationen im südlichen Alptal: Niederschlagssumme (ΣN), oberes Messniveau (A), unteres Messniveau (B).

	VOG A	LUM A	GAM A	ETT A	ZWA A	ERL A		
$\Sigma N [\text{mm a}^{-1}]$	2178	2234	1935	1855	2055	2334		
	VOG B	LUM B	FRI B	BUZ B	GAM B	ETT B	ZWA B	ERL B
$\Sigma N [\text{mm a}^{-1}]$	2097	2296	2196	2035	1987	2003	2339	2304

In der Abbildung 21 sind die Anzahl Schneefalltage (d_s) über die Zeit der Untersuchungsperiode eingetragen um eine Verbindung der Niederschlagswerte mit denjenigen der Lufttemperatur herzustellen.

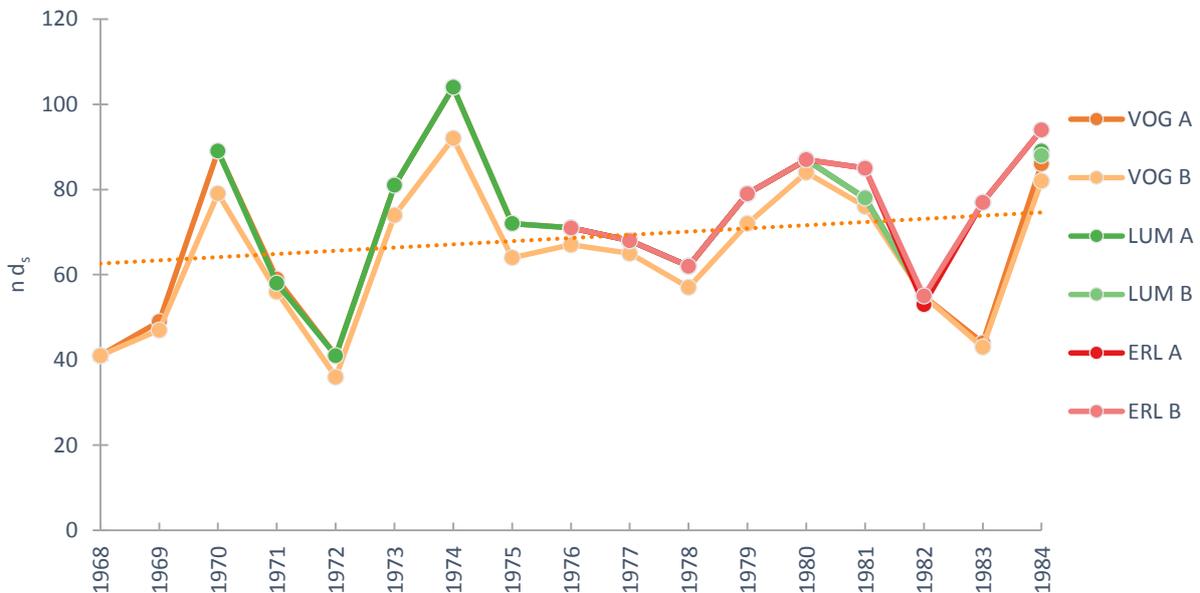


Abbildung 21: Anzahl Tage mit Schneefall an den drei permanenten Messstationen auf zwei unterschiedlichen Messhöhen während der Zeitperiode von 1968 bis 1984 sowie die Trendlinie der Messstation VOG A: $n d_s$ (Anzahl Schneefalltage), Trendlinie (gepunktet).

Die durchschnittliche Anzahl Tage mit Schneefall liegt bei ungefähr $70 d_s a^{-1}$. Ein Maximum an Schneefalltagen war im Winter 1974 zu beobachten. In den Jahren 1968, 1969, 1972, 1983 ereigneten sich Winterhalbjahre mit einer eher geringen Anzahl an Schneefalltagen mit Werten bis $40 d_s a^{-1}$. Die Unterschiede in der Anzahl Tage mit Schneefall sind in den verschiedenen Einzugsgebieten minimal. Jedoch kann aufgrund der Zeitreihen aus dem Gebiet des Vogelbachs festgestellt werden, dass die höher gelegenen Messstationen aufgrund der Temperaturabnahme mit der Höhe einige Schneefalltage pro Jahr mehr aufweisen. Die Trendlinie der Station VOG B im Vogelbachgebiet visualisiert eine leicht positive, aber nicht signifikante Tendenz in Bezug auf die Anzahl Schneefalltage über die Zeitperiode von 1968 bis 1984.

Die Abbildung 22 zeigt die durchschnittliche Niederschlagsentwicklung von 1968 bis 1984 in Bezug auf die Jahreszeiten im Vogelbachgebiet. Die Sommerniederschläge haben im Laufe der Untersuchungsperiode leicht abgenommen, es handelt sich aber um keinen signifikanten Trend. Während die Frühjahrsniederschläge konstant blieben, haben die Niederschläge im Herbst und Winter nicht signifikant zugenommen. Ausserdem ist ersichtlich, dass 1969 grosse Mengen an Sommerniederschlag gefallen sind. Ein regenreiches Winterhalbjahr ereignete sich im Jahr 1981, hingegen weisen die Jahre 1972 und 1975 regenarme Winter auf.

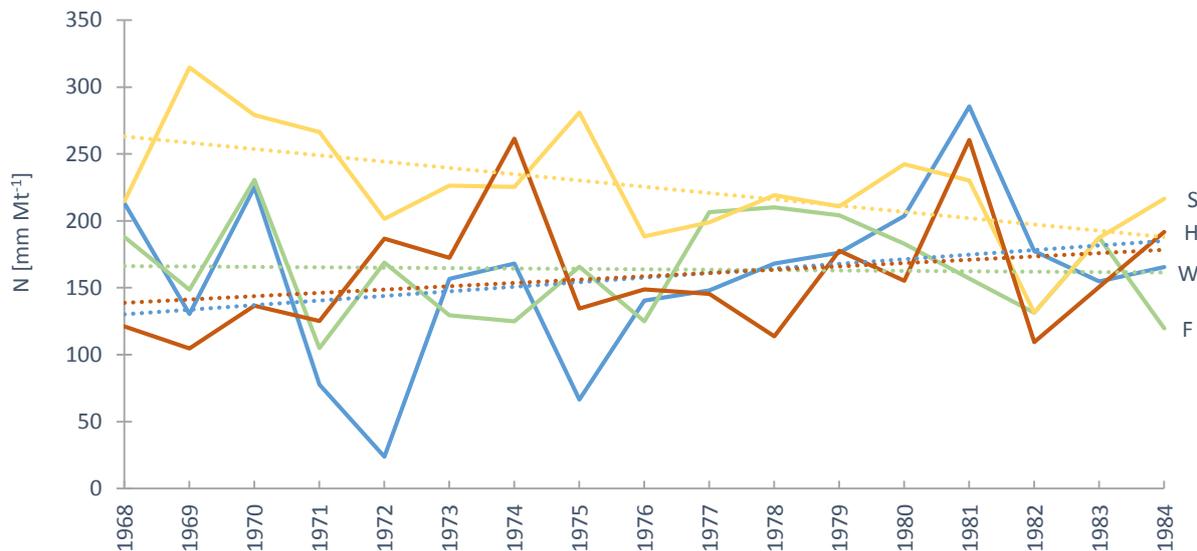


Abbildung 22: Entwicklung der jahreszeitlichen Niederschläge von 1968 bis 1984 im Vogelbachgebiet: Niederschlag (N), Monat (Mt), Winter (W), Frühling (F), Sommer (S), Herbst (H), Trendlinien (gepunktet).

Die Abbildung 23 zeigt die monatlichen Niederschlagssummen der Messstationen auf dem oberen Höhengniveau auf um die monatliche Niederschlagsverteilung innerhalb eines Jahres zu analysieren.

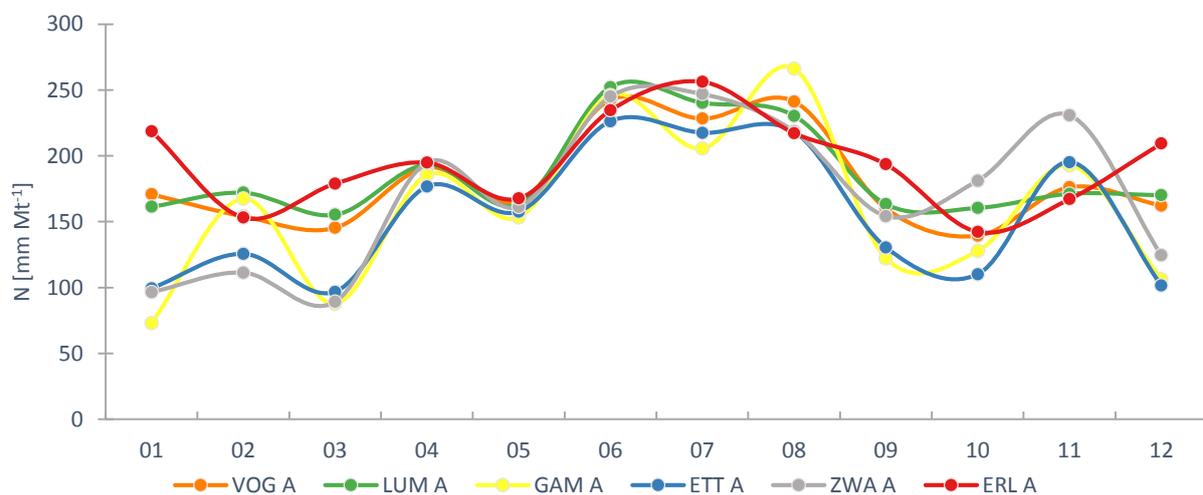


Abbildung 23: Mittlere monatliche Niederschlagssummen der Messstationen auf einer Messhöhe von 1410 bis 1440 m ü. M.: Niederschlag (N), Monat (Mt).

Im Sommer fallen deutlich mehr Niederschläge über das Alptal als in den Wintermonaten. Die grössten monatlichen Niederschlagsmittelwerte sind um die 260 mm Mt^{-1} und wurden in den Monaten Juni bis August erfasst. Die geringsten Mittelwerte verzeichneten die Messstationen zwischen September und März mit Ausnahme des Novembers mit Werten zwischen 80 und 160 mm Mt^{-1} . Neben den Sommer-

monaten sind die Monate April und November die regenreichsten Monate im südlichen Alptal. Ausserdem verlaufen die Zeitreihen der Stationen VOG A, LUM A und ERL A ähnlich zueinander und haben höhere Winterniederschläge in den Monaten Dezember, Januar und März als die Messstationen GAM A, ETT A und ZWA A.

Anhand der Tabelle 24 und den darin enthaltenen statistischen Kennzahlen der Tagesniederschläge lassen sich die unterschiedlichen Messstationen und ihre Zeitserien gut miteinander vergleichen.

Tabelle 24: Statistische Kennzahlen der Tagesniederschläge aller untersuchten Messstationen über die Periode von 1968 bis 1984: Anzahl (n), Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}).

Variable	n-Werte	Max. [mm d⁻¹]	Datum des Max.	\bar{x} [mm d⁻¹]
VOG A	6210	123.4	25.7.84	6.0
VOG B	6210	114	25.7.84	5.8
LUM A	5114	104.5	25.7.84	6.2
LUM B	2924	96.5	25.7.84	6.3
FRI B	2191	67.3	24.2.70	6.0
BUZ B	2922	94.3	31.7.77	5.6
GAM A	2556	63.7	11.8.71	5.3
GAM B	365	63.7	17.8.69	5.4
ETT A	2921	102.8	31.7.77	5.1
ETT B	2557	96.3	31.7.77	5.5
ZWA A	1461	69.1	25.7.84	5.6
ZWA B	5662	155.5	25.7.84	6.4
ERL A	3288	115.6	25.7.84	6.4
ERL B	3288	119.6	25.7.84	6.3

Durch die Anzahl Tageswerte kann man sich einen Überblick über die Länge der Niederschlagszeitreihen machen. Die Totalisatoren VOG A und VOG B, welche im Einzugsgebiet des Vogelbachs liegen, sind mit 6210 Tageswerten komplett. Die Messstation GAM A hat im Gegenzug nur 365 Messwerte, was einer einjährigen Messreihe entspricht (Abb. 7). Im Alptal wurden am 25.07.1984 Spitzenniederschläge von über 120 mm d⁻¹ gemessen. Aufgrund der unterschiedlich langen Zeitserien variiert das Datum mit dem grössten Niederschlagsereignis, jedoch kann man davon ausgehen, dass neben dem 25.07.1984 am 31.07.1977 ein grosses Niederschlagsereignisse im südlichen Alptal stattfand. Anhand der arithmetischen Mittelwerte der Tagesniederschläge ist ersichtlich, dass die Stationen ZWA A, ERL A und ERL B die grössten Tagesdurchschnitte mit 6.4 mm d⁻¹ aufweisen. Die Messstation im Einzugsgebiet des Lümpepenbachs hat ebenfalls hohe Niederschlagsraten mit 6.3 mm d⁻¹ gemessen. Niederschlagssammler mit den geringsten durchschnittlichen Niederschlagssummen befinden sich in den Gebieten des Gämsch- und Etterenbachs mit Tageswerten bis 5.5 mm d⁻¹.

4.1.3 Abflussdaten

Um einen Überblick über das Abflussverhalten der untersuchten Einzugsgebiete zu erhalten, sind in Abbildung 24 die Kastendiagramme der jährlichen Abflusssummen dargestellt. Die Abbildung sowie die dazugehörige Tabelle 25 veranschaulichen die Unterschiede, beziehungsweise Ähnlichkeiten der Zeitserien der untersuchten Einzugsgebiete über die gesamte Messperiode vom 01.01.1968 bis zum 31.12.1984 in Bezug auf die Länge und die jährlichen Abflussmengen.

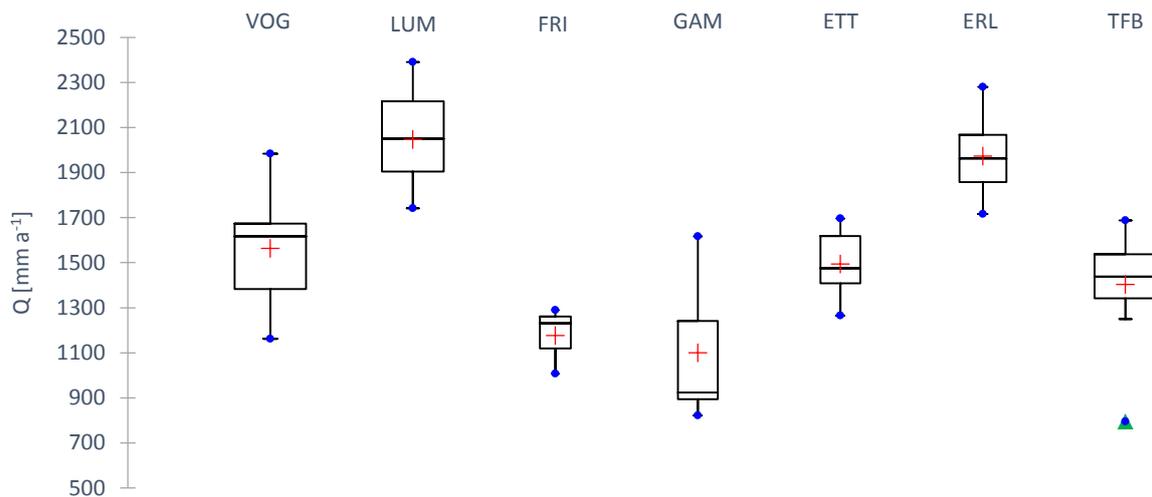


Abbildung 24: Kastendiagramme der originalen, jährlichen Abflusssummen der bemessenen Einzugsgebiete von 1968 bis 1984: Abfluss (Q), Mittelwert (Kreuz), Ausreisser (Dreieck), Min/Max (Kreie).

Der Vogelbach hat bis auf das Jahr 1968 eine komplette Abflusszeitreihe; das Kastendiagramm des Frifangbachs beruht hingegen auf drei Messjahren. Die Minima und die Maxima der jährlichen Abflusssummen weisen sehr grosse Unterschiede auf. Im Lümpepen- und Erlenbach wurde ein Minimum von etwa 1700 mm a⁻¹ gemessen. Die Gebiete Frifang-, Gämsch- und Teufbach weisen hingegen eine minimale Abflussmenge zwischen 800 und 1000 mm a⁻¹ auf.

Die grösste Abflusssumme im südlichen Alptal lag bei fast 2400 mm a⁻¹ und wurde im Lümpepenbachgebiet in den Jahren 1968 bis 1984 gemessen. Ebenfalls ein hoher Maximalwert hat der Erlenbach mit beinahe 2300 mm a⁻¹. Eine geringe maximale Abflusssumme wies der Frifangbach mit 1300 mm a⁻¹ auf. Die Zeitreihe des Frifangbachs weist die geringste Streuung auf; der verfügbare Datensatz ist jedoch mit drei Jahre nicht sonderlich gross. Grosse Streuungen der jährlichen Abflussdatensätze sind im Gebiet des Vogelbachs und des Gämschbachs vorhanden. Die Mittelwerte variieren von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet mit bis zu 1000 mm a⁻¹, was aufgrund der geringen räumlichen Distanz der Messstationen enorm viel ist. Der Lümpepen weist den höchsten Jahresmittelwert mit über 2000 mm a⁻¹ auf, ebenfalls hohe jährliche Abflusssummen sind am Erlenbach messbar (Tab. 25).

Tabelle 25: Jährliche Abflussmittelwerte der untersuchten Einzugsgebiete im Zeitraum von 1968 bis 1984: Abfluss (Q).

	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
Q [mm a ⁻¹]	1563	2046	1176	1099	1493	1973	1403

Die Abbildung 25 zeigt die maximalen, mittleren und minimalen jährlichen Tagesabflusswerte, um das Abflussverhalten während der Untersuchungsperiode genauer zu analysieren.

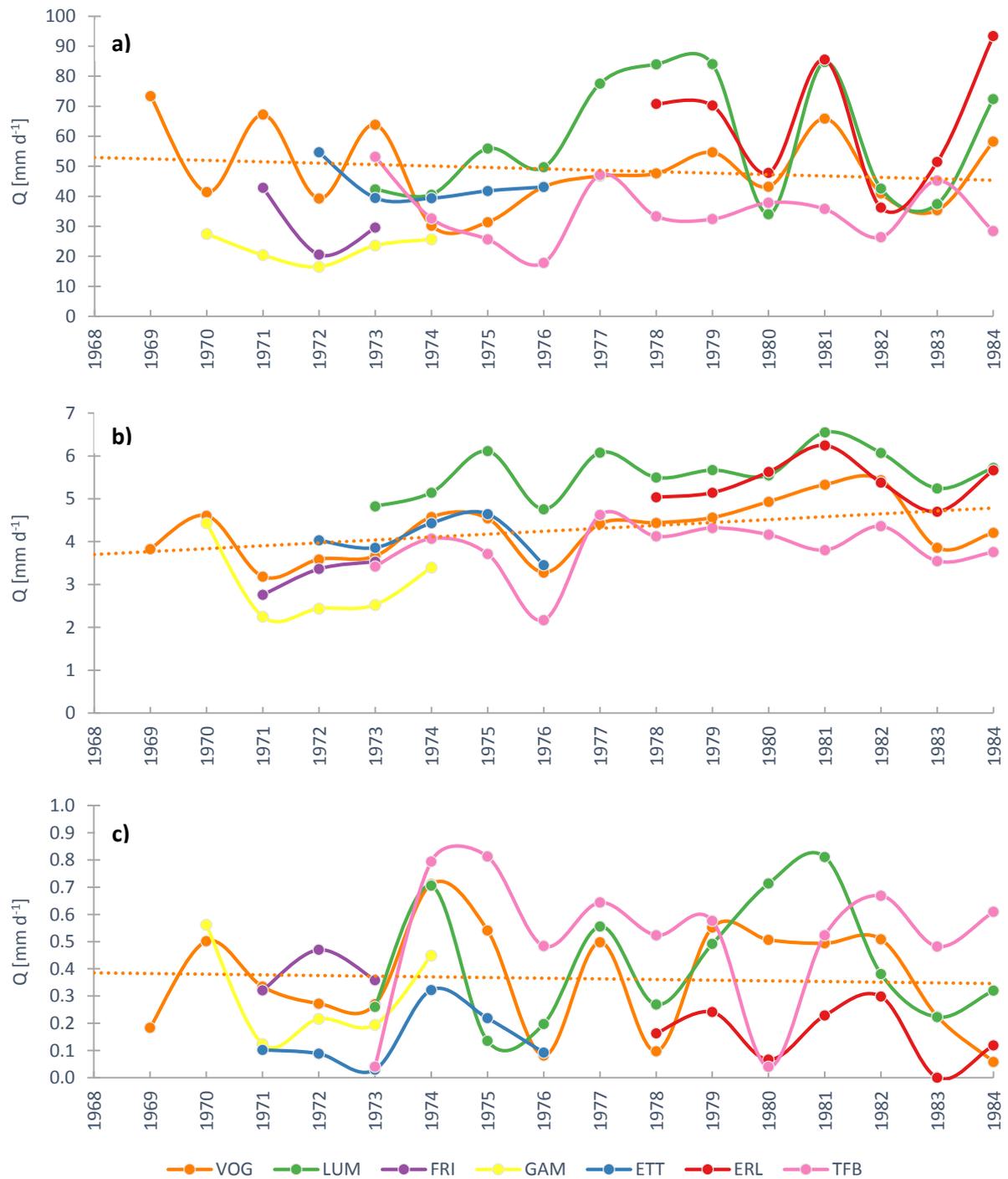


Abbildung 25: Maximale (a), mittlere (b) und minimale (c) jährliche Abflusszeitreihen der untersuchten Einzugsgebiete von 1968 bis 1984, sowie jeweils eine lineare Trendlinie von den Abflussdaten des Vogelbachs: Abfluss (Q), Trendlinien (gepunktet).

Die jährlichen Tagesspitzenabflüsse von über 60 mm d^{-1} ereigneten sich meist in den mit permanenten Abflusstationen ausgerüsteten Bächen des Vogel-, Lämpenen- und Erlenbachs. Ausserdem verzeichnete der Lämpenen- sowie der Erlenbach zwischen 1977 und 1984 mehrfach Abflüsse mit über 80 mm d^{-1} . Extreme Abflussereignisse wurden in den zwei erwähnten Bächen in den Jahren 1978, 1979, 1981 und 1984 gemessen. Auffallend ist, dass sich ein zweijähriger Zyklus der jährlichen maximalen Abflusswerte einstellte, wie zum Beispiel beim Vogelbach von 1969 bis 1974 beobachtet werden kann. Die Trendlinie des Vogelbachs zeigt einen leicht negativen aber nicht signifikanten Trend an, somit zeigten sich in den 80er Jahren eher geringere Abflussraten als in den 60er Jahren (Abb. 25a). Die Abflussmittelwerte bewegen sich zwischen 2.2 mm d^{-1} im Gämbsbach sowie 6.6 mm d^{-1} im Lämpenenbach. Hohe Abflussmengen wurden in den Jahren 1970, 1980, 1981 und 1982 gemessen, die Jahre 1971, 1976 und 1983 waren hingegen von geringen Abflussraten geprägt. Die nicht signifikante Trendlinie des Vogelbachs visualisiert eine Zunahme des jährlichen Abflussmittelwerts im Laufe der Zeit (Abb. 25b). Die Trendlinie der jährlichen Abflussminima des Vogelbachs verläuft ähnlich mit derjenigen der Abflussmaxima. Sie beschreibt wiederum einen nicht signifikanten negativen Trend (Abb. 25c). Generell kann aus den Trendlinien geschlossen werden, dass sich für den Vogelbach die Abflussmittelwerte während der Messperiode erhöhten, aber die Extremwerte leicht zurückgegangen sind.

Die Abbildung 26 zeigt eine signifikante Zunahme der Abflüsse im Frühling im Vogelbach mit Höchstwerten in den 80er Jahren. Die Sommerabflüsse mit den Spitzen in den Jahren 1975, 1980 und 1982 nahmen im Laufe des Untersuchungszeitraums von 1968 bis 1984 nicht signifikant ab. Sehr tiefe Sommerabflüsse wurden im Jahr 1983 gemessen mit einem Durchschnitt von 74 mm Mt^{-1} . Die Winter- und Herbstabflüsse zeigen einen leicht positiven, aber nicht signifikanten Trend. Sehr hohe Abflüsse im Herbst wurden im Jahr 1981 festgestellt mit 193 mm Mt^{-1} .

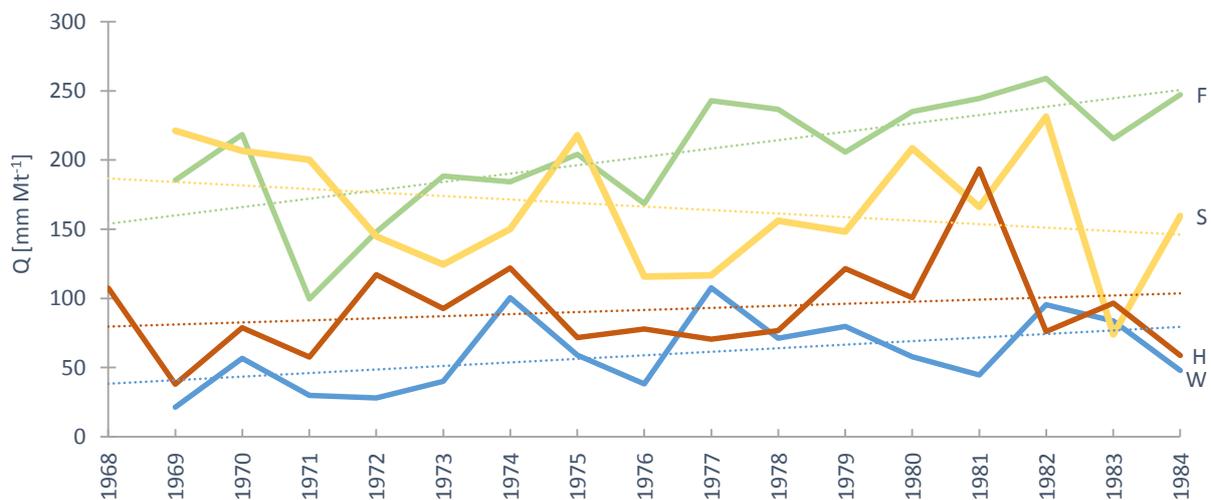


Abbildung 26: Entwicklung der jahreszeitlichen Abflüsse von 1968 bis 1984 im Vogelbach: Abfluss (Q), Monat (Mt), Winter (W), Frühling (F), Sommer (S), Herbst (H), Trendlinien (gepunktet).

Die Diagramme der Abbildung 27 zeigen den Verlauf der Abflussmaxima, -mittelwerte und -minima innerhalb eines Jahres in Bezug auf die Jahreszeiten um das unterschiedliche Abflussverhalten der Einzugsgebiete während den Jahreszeiten aufzuzeigen. Die maximalen Abflussraten mit bis über 600 mm Mt^{-1} sind ungefähr doppelt so hoch wie die mittleren Abflusswerte innerhalb der jeweiligen Jahreszeit. Die grössten maximalen Abflusssummen wurden im Frühling gemessen und die geringsten maximalen Abflussraten mit etwa 180 mm Mt^{-1} im Winter. Im Gegensatz zu den Abflussmittelwerten nehmen die maximalen Abflüsse nach dem Maximum im Frühling im Erlenbach, Etterenbach und dem Teufbach im Herbst nochmals zu (Abb. 26a). Die Mittelwerte visualisieren gut die hohen Abflussraten im Frühling,

welche von knapp 300 mm Mt⁻¹ im Lümpenenbach bis zu 115 mm Mt⁻¹ im Gämschbach reichen. Die Abflussraten im Frifang- sowie im Gämschbachgebiet sind jedoch im Frühling etwa gleich hoch wie im Sommer mit etwa 125 mm Mt⁻¹. Die Abflussraten nehmen nach dem Frühling in allen anderen Einzugsgebieten linear ab, bis zum erneuten Anstieg im nächsten Frühling (Abb. 27b). In der letzten Abbildung 27c sind die minimalen Abflusssummen dargestellt, welche die Niedrigwasserzustände der Bäche im Herbst und Winter aufzeigen, mit Ausnahme des Etterenbachs. Ausserdem sind die Schwankungen bei den minimalen Abflüssen eher gering mit Unterschieden von bis 50 mm Mt⁻¹. Auffallend ist ausserdem, dass die Bäche Frifang und Gämsch ihre grössten minimalen Abflussraten im Sommer erhalten, hingegen wurden im Vogelbach, Lümpenenbach, Erlenbach und Teufbach im Frühling die grössten minimalen Abflusssummen gemessen.

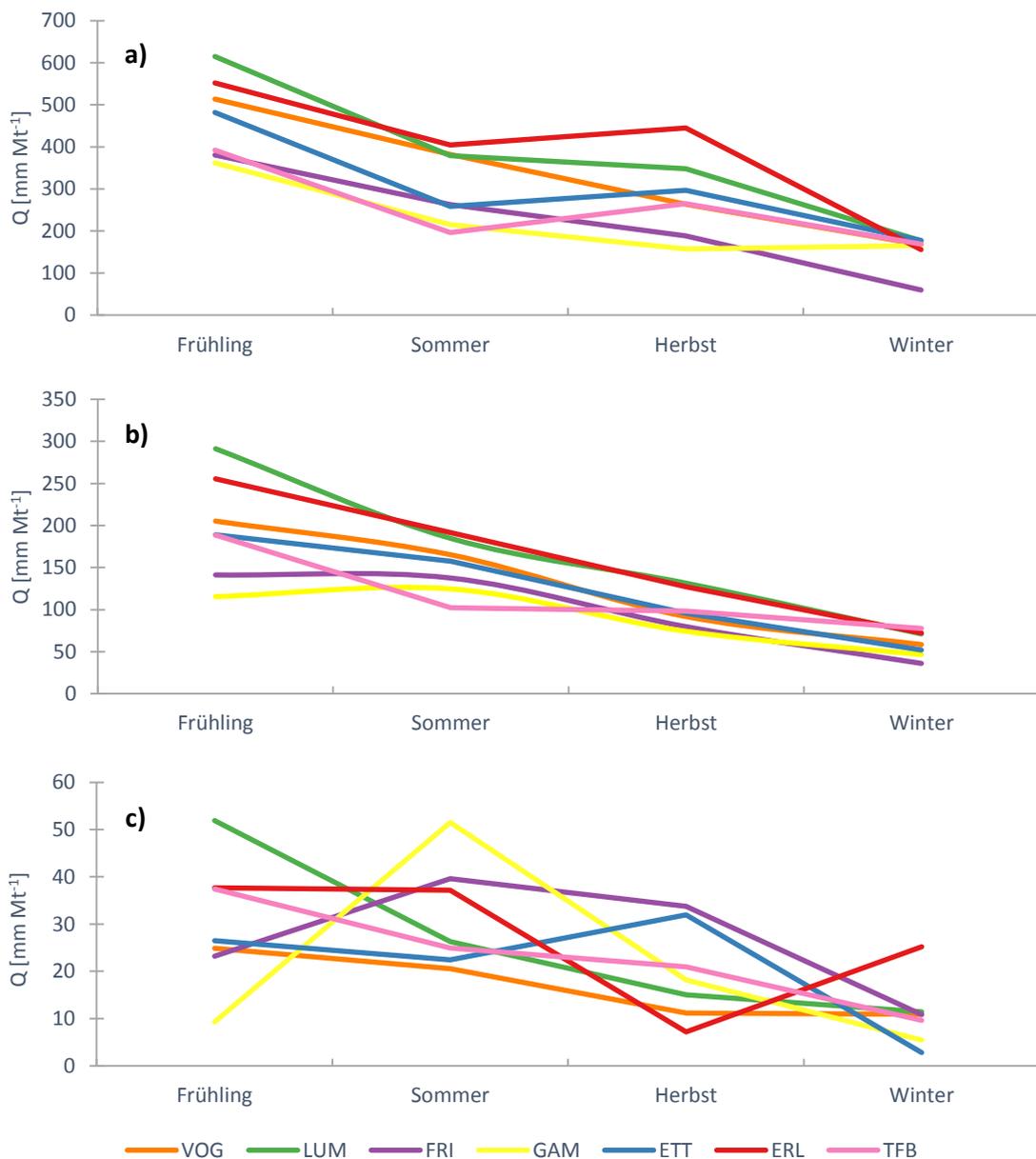


Abbildung 27: Maximale (a), mittlere (b) und minimale (c) Abflussraten der untersuchten Einzugsgebiete in Bezug auf die Jahreszeiten: Abfluss (Q), Monat (Mt).

In der Abbildung 28 sind die maximalen, mittleren und minimalen monatlichen Tagesabflüsse dargestellt, welche an den drei permanenten Messstationen (Vogelbach, Lümpenenbach, Erlenbach) gemessen wurden. Die Kurven geben die bereits zuvor aufgezeigten saisonalen Unterschiede noch im Detail wieder.

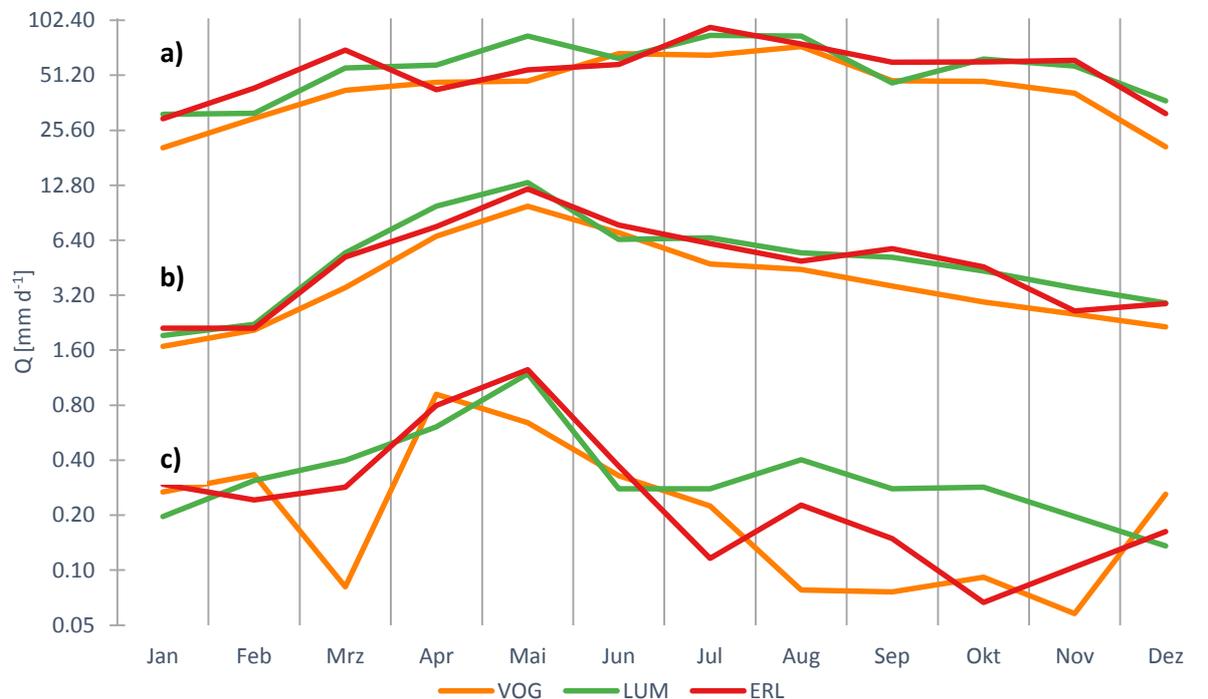


Abbildung 28: Durchschnittliche maximale (a), mittlere (b) und minimale (c) Monatsabflüsse an den Stationen des Vogelbachs, Lümpenenbachs und Erlenbachs: Abfluss (Q).

Im Monat Mai wurden bei allen Einzugsgebieten hohe mittlere und minimale Abflussraten gemessen. Ebenfalls gut zu erkennen sind die Niedrigwasserzustände in den Herbst- und Wintermonaten. Die Spitzenabflüsse sind im Hochsommer, wie anhand der maximalen Abflussraten ersichtlich ist. Die Unterschiede der drei Bäche sind in Bezug auf die monatlichen maximalen, mittleren und minimalen Abflüsse eher gering (Abb. 28a, b). Die sommerlichen Abflüsse sind im Lümpenenbach und dem Erlenbach jedoch meist grösser als im Vogelbach.

Von allen untersuchten Einzugsgebieten sind Abflusstageswerte zwischen dem 01.08.1973 bis zum 11.06.1974 vorhanden. Mit Hilfe einiger statistischer Kennzahlen (Tab. 26) und der Abbildung 29 werden die Einzugsgebiete anhand dieser kompletten, jedoch kurzen Zeitreihen verglichen.

Tabelle 26: Statistische Kennwerte aller Einzugsgebiete für die Abflusstageswerte vom 01.08.1973 bis 11.06.1974: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}), Summe (Σ), Standardabweichung (σ).

Variablen	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
Max. [mm d^{-1}]	26.4	40.8	23.0	17.9	34.2	43.7	32.6
\bar{x} [mm d^{-1}]	3.8	4.5	3.2	2.4	3.5	4.4	3.5
Min. [mm d^{-1}]	0.4	0.6	0.7	0.4	0.2	0.3	0.0
Σ [mm 1^{-1}]	1186.0	1402.2	998.9	740.5	1109.9	1377.2	1114.4
σ	3.9	6.0	3.5	2.4	4.7	5.7	4.3

Der Erlen- und der Lümpenenbach haben mit Abstand die grössten mittleren und maximalen Abflussraten mit 4.4 und 4.5 mm d^{-1} beziehungsweise 43.7 und 40.8 mm d^{-1} . Hingegen wurde beim Gämschbach sowie beim Frifangbach im Vergleich zu den anderen Gebieten sehr geringe mittlere und maximale Abflussraten mit Werten von 2.4 und 3.2 mm d^{-1} beziehungsweise 17.9 und 23.0 mm d^{-1} gemessen. Die aufgezeichnete Abflusssumme während der Zeitperiode vom 01.08.1973 bis 11.06.1974 ist im Gämschbach nur gerade die Hälfte der Summe des Lümpenenbachs. Das grösste Abflussminimum mit 0.7 mm d^{-1} wurde im Frifangbach gemessen. Einige dieser Beobachtungen und Schlüsse wurden bereits aus vorherigen Abbildungen gezogen, jedoch lassen sich diese erst durch diesen Vergleich anhand der gemeinsamen Zeitperiode bestätigen.

Die Abbildung (29) zeigt die untersuchte Zeitperiode anhand der gemessenen Tagesabflussdaten aller Einzugsgebiete und die durchschnittliche Lufttemperatur sowie Niederschlagswerte für die Zeitperiode zwischen dem 01.08.1973 bis 11.06.1974, da für diesen Zeitraum Werte für alle sieben Einzugsgebiete vorhanden sind.

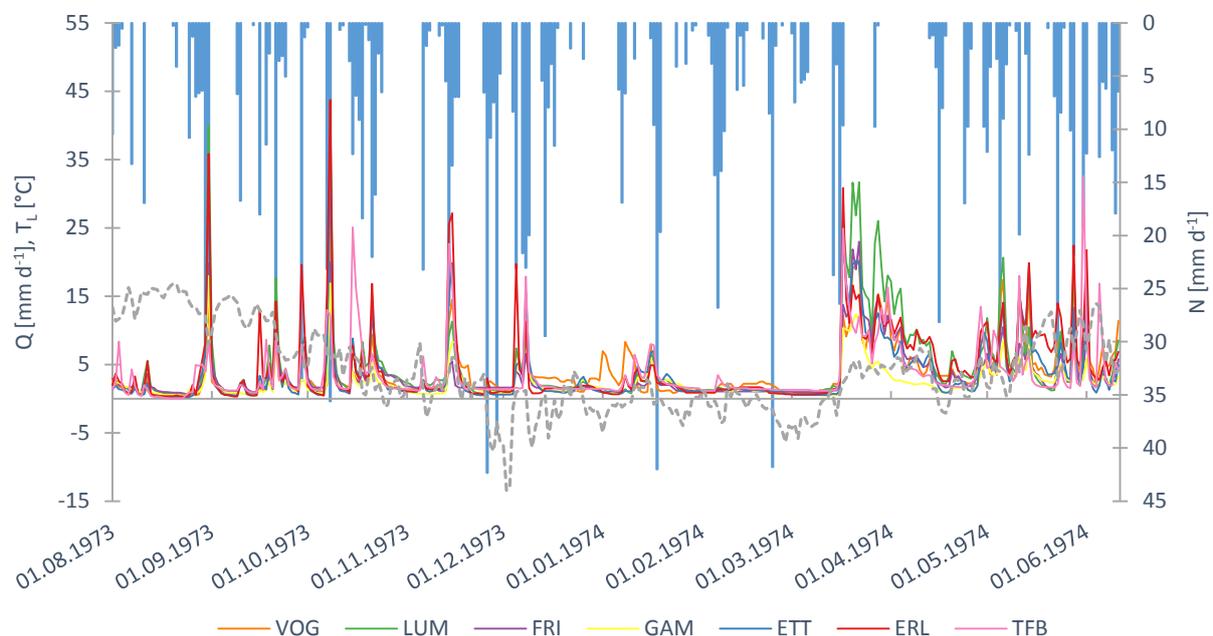


Abbildung 29: Abflusskurven während der Zeitperiode von 01.08.1973 bis 11.06.1974 und die über alle Einzugsgebiete gemittelte Lufttemperatur und Niederschlagswerte der originalen Zeitreihen: Abfluss (Q), Lufttemperatur (T_L) (gepunktet), Niederschlag (N).

Anhand der Abflusskurven lässt sich erkennen, dass die Einzugsgebiete ein ähnliches Abflussverhalten aufweisen. Ab Mitte März steigt die Temperatur über 0 °C und leitet somit die Schneeschmelze ein. Es ist ersichtlich, dass die Abflüsse aufgrund der Schneeschmelze im Vergleich zu Abflüssen, welche aufgrund von Regenfällen entstehen, eher langsam abnehmen und sich über eine längere Zeitdauer erstrecken. Im Jahre 1974 hat sich die Schneedecke gegen Ende April aufgelöst und ab diesen Zeitpunkt werden die Abflüsse wieder nur durch Regenereignisse gespeist. Die durch grosse Niederschlagsereignisse ausgelösten Spitzenabflüsse nehmen auch schnell wieder ab. Das hydrologische System im Alptal zeigt somit schnelle Abflussreaktionen auf Niederschlagsereignisse wie sie im September und Oktober zu sehen sind und eine langsame Reaktion auf die Schneeschmelze im März. Die Abflussraten werden einerseits durch den Niederschlag, aber auch durch die Lufttemperatur bestimmt. Die kühlen Temperaturen im Winter führen zum Aufbau einer Schneedecke und zu geringen Abflüssen. Erst mit dem Anstieg der Temperatur über 0 °C Mitte März nehmen aufgrund eintretendem Regen und dem

Beginn der Schneeschmelze die Tagesabflüsse wieder zu. Die Zeitperiode ist bezüglich einem jährlichen Verlauf schwierig zu analysieren, da keine Werte ab Mitte Juni bis Ende Juli vorhanden sind. Zwischen September und Dezember herrscht Niedrigwasser, jedoch ereigneten sich einzelne grosse Abflussereignisse, welche aufgrund von Starkniederschlägen ausgelöst wurden. Während den Wintermonaten Januar und Februar sind keine grossen Abflussraten erkennbar, da aufgrund der Kälte keine Schmelzeereignisse vorkommen und die Schneedecke durch festen Niederschlag aufgebaut wird.

In der Abbildung 30 werden die Tageswerte des Vogelbachs in Bezug auf Abfluss, Temperatur und Niederschlag des Jahrs 1984 abgebildet, um die hydrologischen Abflussprozess innerhalb eines Jahres zu verdeutlichen. Das Jahr 1984 ist ein durchschnittliches Jahr mit einem grossen Niederschlagsereignis am 25. Juli mit 119 mm d^{-1} .

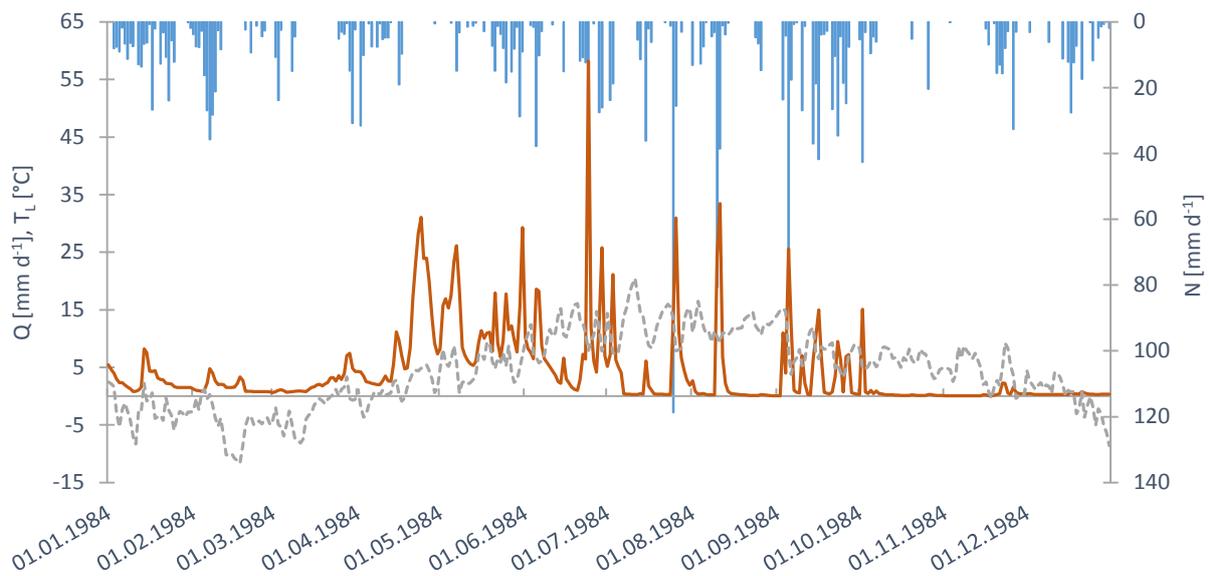


Abbildung 30: Niederschlags- sowie Abfluss- und Temperaturwerte des Vogelbachs im Jahr 1984: Abfluss (Q), Lufttemperatur (T_L) (gepunktet), Niederschlag (N).

Aus der Abbildung 30 geht hervor, dass die Niederschläge, welche zwischen Mitte Oktober und Anfang April fallen, grösstenteils aufgrund der Ausbildung einer Schneedecke nicht zum Abfluss kommen. Ausserdem sieht man, dass Ende April und Anfang Mai die Abflussraten relativ hoch sind, obwohl fast kein Niederschlag fällt. Im Hochsommer sind grosse Niederschlagsereignisse wie dasjenige am 25. Juli für die hohen Abflussraten verantwortlich. Diese Sommergewitter oder Starkniederschläge lassen den Hydrographen und somit die Abflussrate schnell ansteigen, aber ebenso schnell wieder zurückgehen.

4.2 Inter- und extrapolierte Zeitreihen

In diesem Kapitel werden die mit Inter- und Extrapolation komplettierten Zeitreihen der Hilfsparameter Lufttemperatur und Niederschlag, welche für die Modellierung des Abflusses im HBV-Modell unerlässlich sind, analysiert und verglichen. Ausserdem werden die zwei Parameter über den Lauf der gesamten Untersuchungsperiode untersucht, um mögliche Veränderung über die Zeit festzustellen. Des Weiteren wird auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den originalen und den inter- und extrapolierten Datensätze hingewiesen.

4.2.1 Temperaturdaten

In der Abbildung 31 werden die statistischen Kennzahlen der inter- und extrapolierten Zeitreihen der jährlichen Lufttemperaturen anhand von Kastendiagrammen dargestellt, was den Vergleich der Einzugsgebiete vereinfacht und die Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufzeigt.

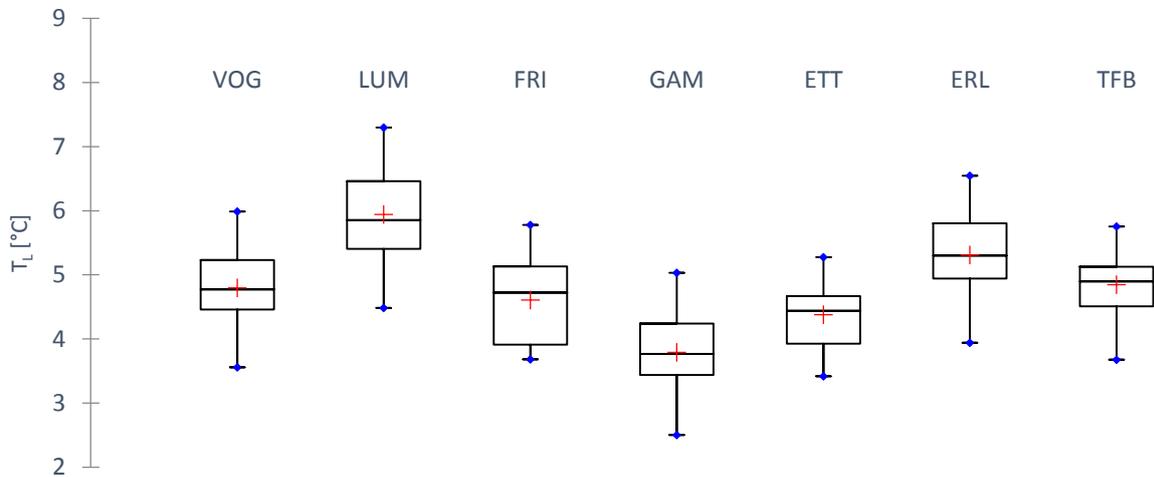


Abbildung 31: Kastendiagramme der jährlichen Lufttemperaturdaten der komplettierten Zeitreihen der gesamten Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L), Mittelwert (Kreuz), Min/Max (Kreis).

Das Vogelbachgebiet ist ein sehr durchschnittliches Einzugsgebiet in Bezug auf die Lufttemperatur mit einer mittleren Jahrestemperatur von 4.8 °C und einer Amplitude von 3.6 bis 6.0 °C. Das Einzugsgebiet des Lümpenenbachs hat die höchsten Lufttemperaturwerte während der Untersuchungsperiode mit einem Mittelwert von 5.9 °C. Den grössten Jahresmittelwert mit 7.3 °C wurde ebenfalls für das Lümpenenbachgebiet geschätzt. Das Gebiet des Frifangbachs besitzt ähnliche Jahreswerte wie das Vogelbachgebiet. Der grösste Unterschied dieser zwei Einzugsgebiete besteht in der Länge des Interquartilsabstand, welcher im Frifanggebiet deutlich grösser ausfällt. Für das Gebiet des Gämschbachs wurden die tiefsten Lufttemperaturen geschätzt. Die jährlichen Temperaturwerte schwanken zwischen 2.5 bis 5.0 °C, mit einem Mittelwert von 3.8 °C. Es ist erstaunlich, dass das Gebiet nur 3.5 km vom Lümpenenbachgebiet entfernt ist und sich der jährliche Mittelwert um 2 °C unterscheidet.

Das Gebiet des Etterenbachs hat die zweitiefsten jährlichen Lufttemperaturwerte und ist somit vergleichbar mit denjenigen des Gämschbachgebiets, obwohl der Mittelwert um 0.4 °C höher liegt. Für die permanente Messstation im Erlenbachgebiet wurden ähnliche Temperaturen wie im Vogelbach- und dem Teufbachgebiet geschätzt. Die Daten des Teufbachs, welche allesamt mit Hilfe der multiplen linearen Regression geschätzt wurden, weisen eine geringe Streuung auf und verhalten sich ähnlich wie die Temperaturdaten im Vogelbachgebiet.

Die Temperaturzeitserien innerhalb der Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 haben mit Ausnahme des Lümpenenbachs einen ähnlichen Verlauf und widerspiegeln oftmals die Temperaturzeitreihe des Vogelbachgebiets auf unterschiedlichen Temperaturniveaus (Abb. 32). Für das Lümpenenbachgebiet wurden mit Ausnahme von 1972 bis 1976 die höchsten Werte gemessen beziehungsweise geschätzt. Die tiefsten Lufttemperaturen wurden mit Ausnahme des Jahres 1976 für das Gämschbachgebiet berechnet.

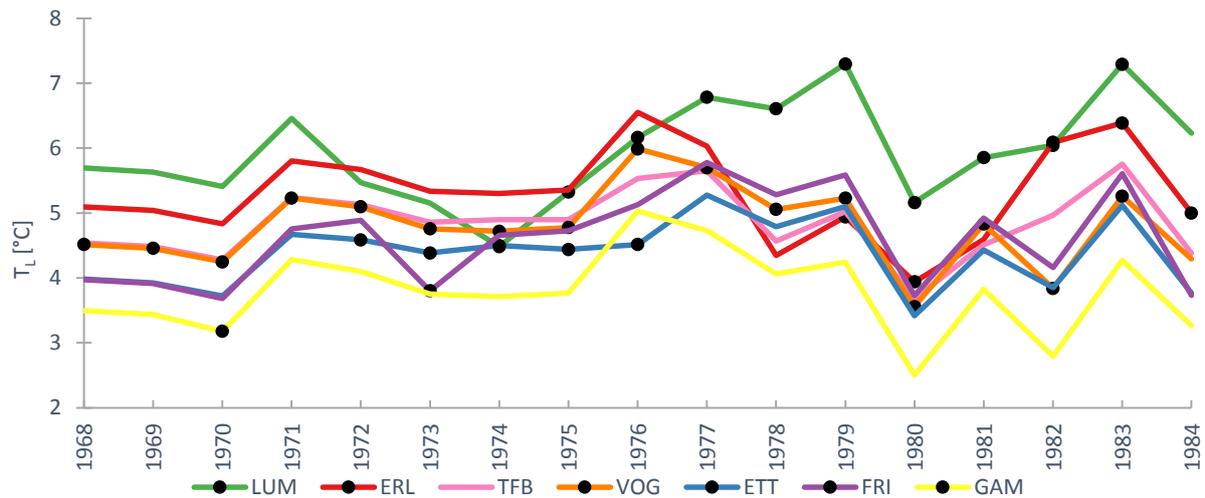


Abbildung 32: Der zeitliche Verlauf der inter- beziehungsweise extrapolierten Lufttemperaturzeitreihen während der Untersuchungsperiode über die gesamte Messperiode von 1968 bis 1984 sowie die originalen Temperaturdaten: Lufttemperatur (T_L), originale Jahrestemperaturwerte (Kreis).

Die jährlichen Mittelwerte aller untersuchten Einzugsgebiete und die dazugehörigen Werte sowie die dazugehörige lineare Trendlinie sind in der Abbildung 33 eingezeichnet.



Abbildung 33: Durchschnittliche Jahresmittelwerte der komplettierten Zeitserien aller untersuchten Einzugsgebiete über die gesamte Messperiode von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L), Trendlinie (gepunktet).

Die höchsten Jahresmittelwerte wurden für die Jahre 1977 und 1983 mit einem Wert von 5.7 °C berechnet. Ausserdem war das Jahr 1976 mit einem durchschnittlichen Jahreswert von 5.6 °C beinahe gleich warm. Hingegen liegt der Jahreswert von 1980 mit 3.7 °C deutlich unter dem Durchschnitt von 4.8 °C (Abb. 32, 33). Die Trendlinie der Jahresmittelwerte visualisiert eine leicht positive, aber nicht signifikante Tendenz innerhalb der Periode von 1968 bis 1984 (Abb. 33). Genauer betrachtet haben in allen Gebieten die Temperaturen in den Herbst- und Sommermonaten zugenommen, wobei nur die Zunahme des Lümpenenbachgebiets im Herbst mit +1.3 °C während der 17-jährigen Untersuchungsperiode signifikant ist. Im Winter haben die Temperaturen im südlichen Alptal mit Ausnahme derjenigen im Frifangbachgebiet abgenommen. Eine signifikante Abnahme mit -0.9 °C wurde nur für das Gämischbachgebiet ermittelt. Im Frühling haben die Lufttemperaturen mit Ausnahme des Gebiets Lümpenenbach nicht signifikant abgenommen.

In der Abbildung 34 sind die maximalen, mittleren und minimalen monatlichen Lufttemperaturdaten der gesamten Untersuchungsperiode eingezeichnet. Anhand dieser Grafiken lassen sich detaillierte Aussagen über den Verlauf der Lufttemperaturen innerhalb eines Jahres machen, sowie die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der verschiedenen Einzugsgebiete analysieren.

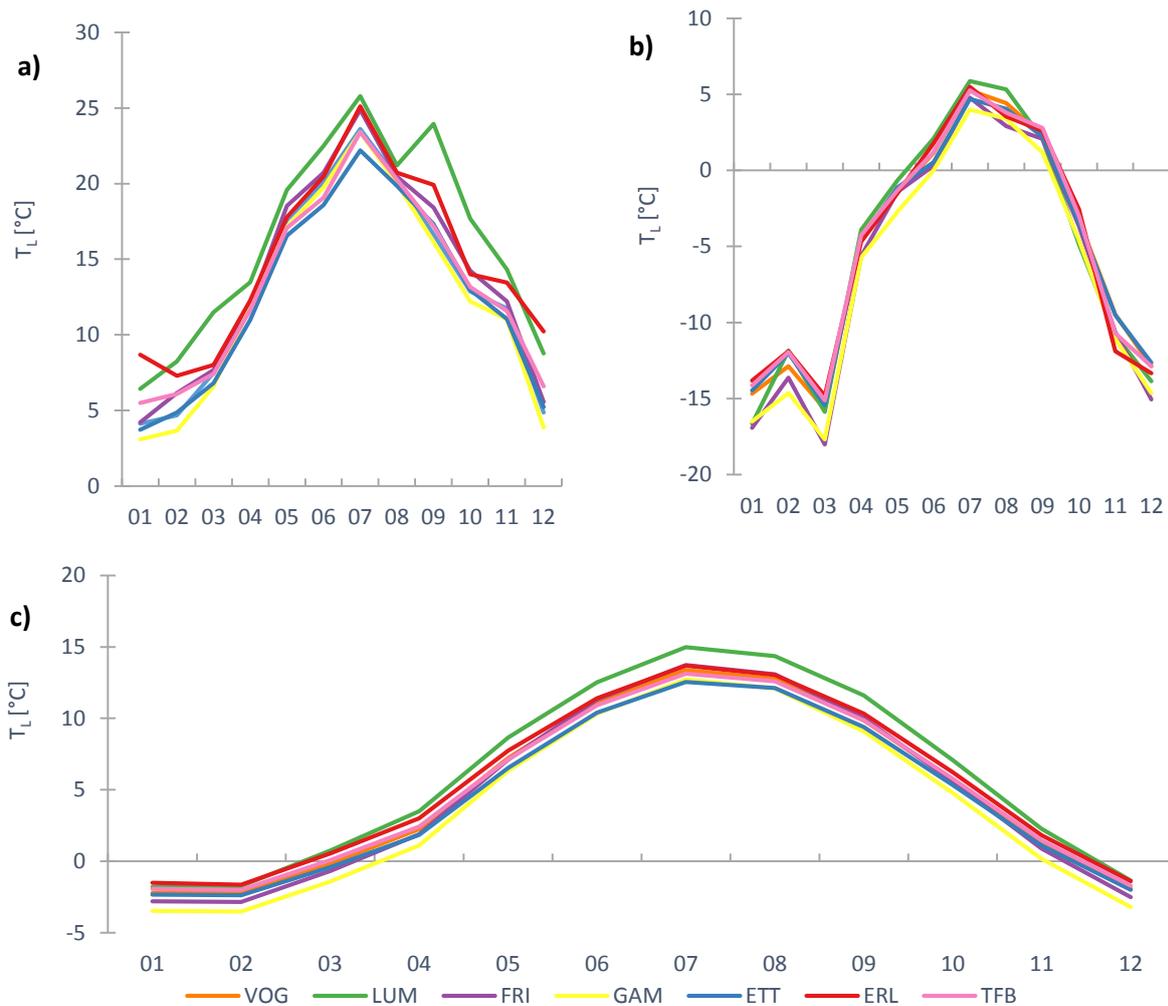


Abbildung 34: Maximale (a), minimale (b) und mittlere (c) monatliche Lufttemperaturen aller untersuchten Einzugsgebiete für den Zeitraum von 1968 bis 1984: Lufttemperatur (T_L).

Der jährliche Verlauf der Monatsmittelwerte (Abb. 34c) zeigt bei allen Gebieten dieselbe harmonische Kurve mit Höchstwerten in den Monaten Juli und August sowie tiefen Lufttemperaturen im Dezember, Januar und Februar. Die tiefsten Temperaturen verzeichnet das Gämschbachgebiet mit einem Minimum im Februar. Die höchsten mittleren Monatswerte wurden für das Gebiet des Lümpenenbachs mit einem Maximum im Juli ermittelt. Die Jahresverläufe der maximalen (Abb. 31a) und minimalen (Abb. 31b) Lufttemperaturen widerspiegeln sich ebenfalls in dem ähnlichen Verlauf der mittleren monatlichen Lufttemperaturen des jeweiligen Einzugsgebiets. Die maximalen Lufttemperaturen haben ihr Maximum im Juli, in welchem die Temperaturen 23.9 bis 27.7 °C betragen. Im Gebiet des Lümpenenbachs steigt nach erstem Absenken die maximale Temperatur im September nochmals an. Die höchsten monatlichen Lufttemperaturwerte in den Wintermonaten sind für das Erlenbachgebiet geschätzt worden (Abb. 34a). Die Jahresverläufe der minimalen Temperaturen der unterschiedlichen Einzugsgebiete zeigen ein ähnliches Bild. Nur während den vier Sommermonaten (Juni, Juli, August und September) wurden minimale Monatswerte von über 0 °C berechnet. Spannend ist ausserdem die Temperaturabnahme im März von zirka 5 °C im Vergleich zum Februar (Abb. 34b).

In der Tabelle 27 werden die originalen durchschnittlichen Monatsmittelwerte der untersuchten Einzugsgebiete mit denjenigen der kompletten Datensätze verglichen, um einen Anhaltspunkt über die Qualität der Inter- und Extrapolationsmethode (Kap. 3.2) zu erhalten. Anhand der Differenz zwischen

den Datensätzen sind Aussagen über die Funktionsweise der multiplen linearen Regression zur Komplettierung von lückenhaften Datensätze sowie zu entstandenen Unsicherheiten möglich.

Tabelle 27: Vergleich zwischen den durchschnittlichen Monatstemperaturen der originalen und komplettierten Datensätze in Bezug auf die maximalen, mittleren und minimalen monatlichen Lufttemperaturen.

MAX	Originaler Datensatz [°C]	Kompletter Datensatz [°C]	Absolute Differenz [°C]
Jan	4.8	5.1	0.3
Feb	5.1	5.9	0.8
Mrz	6.9	7.9	1.0
Apr	11.0	12.0	1.0
Mai	15.0	17.7	2.7
Jun	19.0	20.2	1.2
Jul	21.6	24.1	2.5
Aug	19.7	20.4	0.7
Sep	17.8	18.5	0.7
Okt	12.8	13.9	1.1
Nov	11.1	12.2	1.1
Dez	6.0	6.4	0.4
MEAN	Originaler Datensatz [°C]	Kompletter Datensatz [°C]	Absolute Differenz [°C]
Jan	-2	-2.3	0.3
Feb	-2.2	-2.3	0.1
Mrz	-0.4	-0.2	0.2
Apr	2.3	2.3	0.0
Mai	6.7	7.3	0.6
Jun	11.2	11.1	0.1
Jul	13.4	13.5	0.1
Aug	13	12.9	0.1
Sep	10.1	10	0.1
Okt	5.4	5.8	0.4
Nov	1.3	1.3	0.0
Dez	-2.3	-2	0.3
MIN	Originaler Datensatz [°C]	Kompletter Datensatz [°C]	Absolute Differenz [°C]
Jan	-13.8	-15.3	1.5
Feb	-11.5	-12.7	1.2
Mrz	-12.0	-16.1	4.1
Apr	-4.6	-4.7	0.1
Mai	-1.0	-1.5	0.5
Jun	2.5	1.0	1.5
Jul	5.5	5.0	0.5
Aug	4.7	3.9	0.8
Sep	2.7	2.2	0.5
Okt	-2.8	-3.6	0.8
Nov	-10.1	-10.6	0.5
Dez	-13.7	-13.6	0.1

Die absolute Differenz der Monatsmittelwerte schwankt zwischen den Zeitreihen von maximalen 0.6 °C im Monat Mai bis zu 0.0 °C im April und November. Die durchschnittlichen maximalen Temperaturwerte der komplettierten Zeitreihen sind allesamt höher als diejenigen der originalen Temperaturzeitreihe und zwar um 0.3 bis 2.8 °C, wobei die grössten absoluten Differenzen während den Sommermonaten zustande kommen. Bei den Minimalwerten zeigt sich ein ähnliches Bild: Die Werte aus den komplettierten Zeitserien sind mit Ausnahme des Dezembers geringer als die Werte aus den originalen Zeitserien. Die absoluten Differenzen reichen von 0.1 °C im Monat Dezember bis hin zu 4.1 °C Unterschied im Monat März.

Die Tabelle 28 enthält statistische Kennzahlen der Lufttemperaturtageswerte und verdeutlicht nochmals die Unterschiede der Temperaturzeitreihen der verschiedenen Einzugsgebiete. Neben den arithmetischen Mittel sind die geschätzten Minimum- und Maximumtemperaturen mit den dazugehörigen Daten enthalten.

Tabelle 28: Statistische Kennzahlen der Lufttemperaturtageswerte der sieben Einzugsgebiete aus der gesamten Zeitperiode von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}).

Variable	Max. [°C]	Datum des Max.	\bar{x} [°C]	Min. [°C]	Datum des Min.
VOG	23.6	31.07.83	4.8	-15.7	06.03.71
LUM	25.8	31.07.83	5.9	-16.7	29.01.76
FRI	24.9	31.07.83	4.6	-18.0	06.03.71
GAM	23.4	31.07.83	3.8	-17.7	06.03.71
ETT	22.2	31.07.83	4.4	-15.4	06.03.71
ERL	25.1	27.07.83	5.3	-14.8	06.03.71
TFB	23.4	31.07.83	4.8	-15.1	06.03.71

Die maximalen Lufttemperaturen entstammen dem Lümpenenbachgebiet mit einem Höchstwert von 25.8 °C. Der heisseste Tag zwischen 1968 und 1984 war in allen Gebieten, mit Ausnahme des Erlimbachs, der 31.07.1983. Die Mittelwerte variieren zwischen 3.8 °C im Gämschbachgebiet und 5.9 °C im Lümpenenbachgebiet. Der kälteste Tag für die Einzugsgebiete im südlichen Alptal war mit Ausnahme des Lümpenenbachgebiets der 06.03.1971 mit einem Maximum im Frifangbachgebiet von -18.0 °C. Im Vergleich zu den originalen Zeitreihen sind die Mittelwerte mit Ausnahme des Etterenbach und des Vogelbachs angestiegen, wobei die Vogelbachzeitreihe bereits vollständig war. Die grösste Zunahme des Mittelwerts ist in den Gebieten Frifang- und Gämschbach ersichtlich. Ebenfalls haben die Minimum- und Maximumwerte im Frifang-, Gämsch- und Etterenbachgebiet zu- beziehungsweise abgenommen, so dass die Amplitude in diesen Gebieten insgesamt grösser wurde.

Gebiete welche hohe durchschnittliche Tagestemperaturwerte aufweisen (Tab. 28), wie das Lümpe-
nen- und das Erlenbachgebiet, haben eine geringere Anzahl an kalten Tagen als beispielsweise das
Einzugsgebiet des Gämschbachs mit dem tiefsten Temperaturmittelwert. Die Jahre 1980 und 1982
weisen die meisten kalten Tage mit etwa $130 \text{ d}_m \text{ a}^{-1}$ auf. Die geringste Anzahl mit $73 \text{ d}_m \text{ a}^{-1}$ wurde für
das Jahr 1972 geschätzt. Die Trendlinie zeigt eine signifikante positive Zunahme der Anzahl kalte Tage
über die Zeitperiode von 1968 bis 1984.

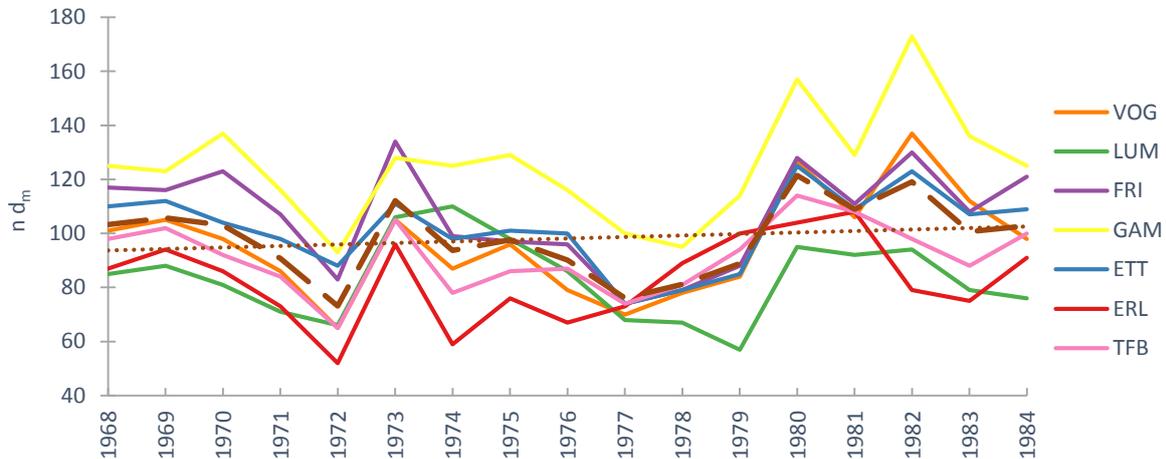


Abbildung 35: Anzahl kalten Tage ($T_L \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$) der Einzugsgebiete im Alptal zwischen 1968 und 1984 und die jährlichen Mittel-
werte aller Lufttemperaturdatensätze sowie die dazugehörige Trendlinie: Anzahl kalte Tage ($n \text{ d}_m$), Mittelwert (gestrichelt),
Trendlinie (gepunktet).

4.2.2 Niederschlagsdaten

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit den inter- und extrapolierten Zeitreihen der Niederschlags-
werte. Anhand der Kastendiagramme (Abb. 36) und der Tabelle 29, in welchen die Jahresnieder-

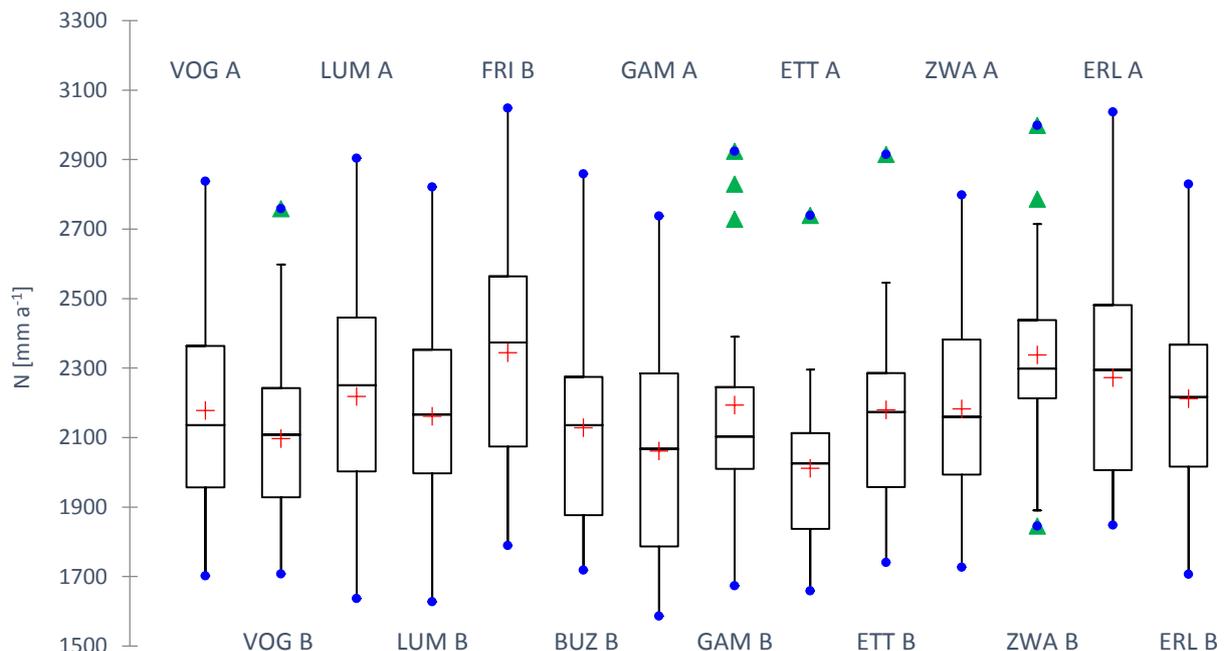


Abbildung 36: Kastendiagramme der mittleren Jahresniederschlagssummen der Messstationen im südlichen Alptal für die
Zeitperiode von 1968 bis 1984: Niederschlag (N), Mittelwert (Kreuz), Ausreisser (Dreieck), Min/Max (Kreis).

schlagssummen aller Messstationen im südlichen Alptal dargestellt sind, lassen sich bereits einige statistische Merkmale sowie Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den verschiedenen Stationen im südlichen Alptal feststellen.

Die jährlichen Niederschlagssummen reichen von 1586 (GAM A) bis über 3000 mm a⁻¹ (FRI B, ERL A) (Abb. 36). Die grösste Amplitude über die Zeitperiode von 1968 bis 1984 weist der Totalisator LUM A mit 1268 mm a⁻¹ auf. Die geringste Amplitude wurde für die Messstation VOG B mit 1051 mm a⁻¹ geschätzt. Der grösste Mittelwert der jährlichen Niederschlagssummen wird an der Station FRI B gemessen und liegt bei knapp 2350 mm a⁻¹ (Tab. 29). Die tiefste Summe wurde für den Totalisator ETT A mit knapp über 2000 mm a⁻¹ geschätzt. Sieben der neun Ausreisser stammen aus den niederschlagsreichen Jahren 1970 und 1981 mit Werten über 2500 mm a⁻¹. Ein weiterer Ausreisser symbolisiert die hohe Niederschlagssumme im Jahr 1974 bei der Station GAM B und der letzte Ausreisser steht für die geringe Niederschlagssumme im Zwäckentobel mit 1891 mm a⁻¹ im Jahr 1976. Die Datensätze der Messstationen GAM B, ETT A und ZWA B sind abgesehen von den Ausreissen ziemlich einheitlich und nur in geringem Masse gestreut.

Im Vergleich zu den originalen Zeitreihen haben die mittleren Jahresniederschlagssummen an den Messstationen LUM A, LUM B, ETT B, ERL A und ERL B abgenommen. Die Summen der Stationen im Vogelbachgebiet sowie ZWA B sind konstant geblieben. An allen anderen Messstationen hat die mittlere Jahresniederschlagssumme zugenommen (Tab. 29).

Tabelle 29: Übersicht über die durchschnittlichen, jährlichen Niederschlagssummen aller Niederschlagsmessstationen im südlichen Alptal: Niederschlagssumme (ΣN), oberes Messniveau (A), unteres Messniveau (B).

	VOG A	LUM A	GAM A	ETT A	ZWA A	ERL A			
ΣN [mm a⁻¹]	2178	2218	2061	2012	2183	2272			
	VOG B	LUM B	FRI B	BUZ B	GAM B	ETT B	ZWA B	ERLB	
ΣN [mm a⁻¹]	2097	2161	2345	2129	2194	2180	2338	2212	

In den Jahren 1971, 1972, 1975 und 1976 ist verhältnismässig wenig Niederschlag gefallen mit Summen unter 1900 mm a⁻¹ (Abb. 37). Die Unterschiede zwischen dem originalen und komplettierten Niederschlagsverlauf über die gesamte Untersuchungsperiode sind gering. Der maximale Unterschied beträgt 124 mm a⁻¹ im Jahr 1969.

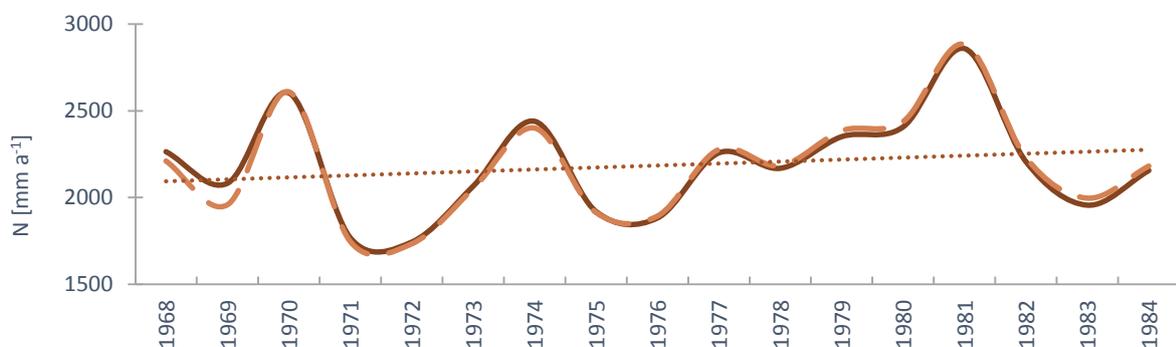


Abbildung 37: Durchschnittliche Niederschlagssummen aller untersuchten Einzugsgebiete während dem Zeitraum von 1968 bis 1984 der originalen (gestrichelt) und komplettierten Datensätze (durchgezogen) und deren Trendlinie: Niederschlag (N), Trendlinie (gepunktet).

Die lineare Trendlinie visualisiert eine leicht positive Tendenz, somit sind die frühen 80er Jahre im südlichen Alptal grundsätzlich niederschlagsreicher als die 70er Jahren, wobei es sich bei dieser Tendenz um keinen signifikanten Trend handelt.

Neben den niederschlagsreichen, beziehungsweise niederschlagsarmen Jahren, welche in der Abbildung 37 dargestellt sind, zeigt die Abbildung 38 Zeitreihen einzelner Messstationen von 1968 bis 1984. Die Zeitserie der Messstation ETT A verläuft im Vergleich zu den anderen Stationen auf derselben Messhöhe bis ins Jahr 1978 auf einem deutlich tieferem Niveau. Die Messstation ERL A hat mit Ausnahme der Jahre 1978 bis 1980 die höchsten Niederschlagssummen gemessen. Ausserdem verzeichneten die Totalisatoren ERL A und LUM A im Jahre 1977 einen Anstieg der Niederschlagssummen von etwa 500 mm a^{-1} im Vergleich zum Vorjahr, welcher bei den anderen Totalisatoren nicht festgestellt wurde.

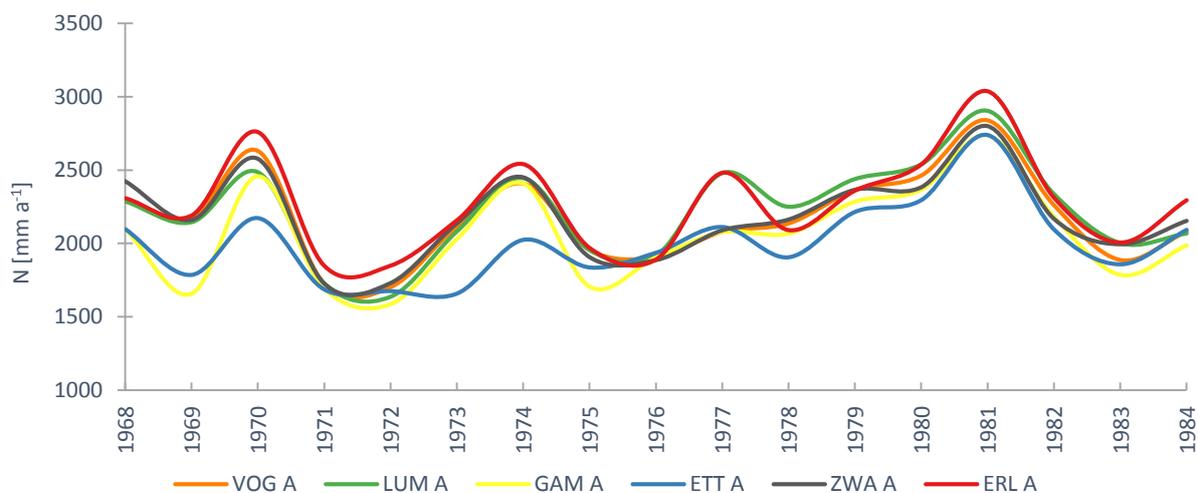


Abbildung 38: Jährliche Niederschlagssummen im Laufe der Untersuchungsperiode auf dem oberen Höhengniveau.

Für die durchschnittlichen Niederschlagsentwicklungen aller Einzugsgebiete von 1968 bis 1984 in Bezug auf die Jahreszeiten sind im Vergleich zur Niederschlagsentwicklung im Vogelbachgebiet keine nennenswerte Unterschiede bezüglich den Kurven und Trendlinien sichtbar.

Anhand der maximalen Monatssummen in der Abbildung 39a ist ersichtlich, dass die grössten Niederschlagssummen im Zeitraum von 1968 bis 1984 im Winterhalbjahr gefallen sind; hauptsächlich in den Monaten Dezember, Februar und April mit bis zu 500 mm Mt^{-1} . Die Starkniederschläge in den Monaten März, Mai und November sind von geringerer Heftigkeit mit Summen zwischen 250 und 350 mm Mt^{-1} . Während den Sommermonaten halten sich die maximalen monatlichen Niederschläge sehr konstant auf zirka 400 mm Mt^{-1} . Die Jahresverläufe der mittleren Monatssummen der permanenten Messstationen verlaufen sehr ähnlich. Am wenigsten Niederschlag ist durchschnittlich in den Monaten März und Oktober mit etwa 150 mm Mt^{-1} gefallen. Die grössten mittleren Monatssummen mit 250 mm Mt^{-1} wurden im Hochsommer während den Monaten Juni und August gemessen (Abb. 39b). Die grössten minimalen Monatssummen (Abb. 39c) wurden in den Monaten Mai, Juni und August registriert, mit Ausnahme der Station ERL A, welche auch im Juli eine hohe minimale Summe aufweist. Die geringsten Niederschlagssummen sind während den Wintermonaten mit zirka 20 mm Mt^{-1} gefallen. Erstaunlich ist die starke Abnahme des Niederschlags im Monat Juli bei den Stationen VOG A und LUM A.

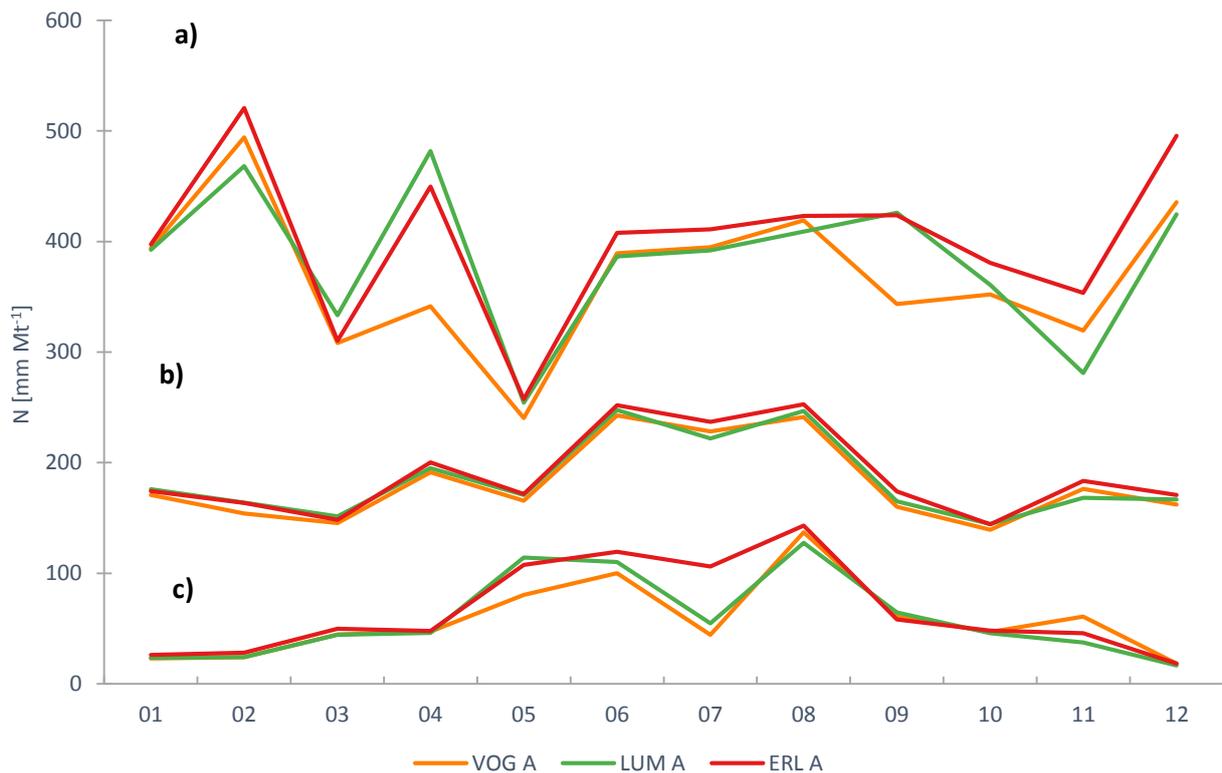


Abbildung 39: Maximale (a), mittlere (b) und minimale (c) monatliche Niederschlagssummen der drei permanenten Messstationen für die Zeitperiode von 1968 bis 1984: Niederschlag (N).

In der Tabelle 30 werden die mittleren monatlichen Niederschlagssummen der originalen und kompletten Datensätze gegenübergestellt und die Differenzen zwischen den beiden Datensätzen berechnet. Die Differenz gibt einen Anhaltspunkt über die Schwere der Fehler und Unsicherheiten, welche durch die Inter- und Extrapolation der Niederschlagszeitreihen entstanden sind.

Tabelle 30: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagssummen der originalen und kompletten Datensätze für die Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 anhand der Differenz.

Monat	Originaler Datensatz [mm Mt ⁻¹]	Kompletter Datensatz [mm Mt ⁻¹]	Absolute Differenz [mm Mt ⁻¹]
Jan	138.8	169.8	31.0
Feb	152.4	155.2	2.8
Mrz	124.7	143.5	18.8
Apr	196.7	190.2	6.5
Mai	161.7	167.3	5.6
Jun	248.5	242.1	6.4
Jul	230.6	225.2	5.4
Aug	242.5	243.1	0.6
Sep	152.2	167.8	15.6
Okt	139.9	140.9	1.0
Nov	192.0	174.8	17.2
Dez	149.9	164.3	14.4

In den Monaten Februar, April bis August und Oktober stimmen die Werte, trotz lückenhaftem Datensatz, gut überein. In diesen Monaten liegt der durch die Inter- und Extrapolation entstandene Fehler zwischen 0.6 und 6.5 und damit unter 3.5 %. In den anderen fünf Monaten weichen die monatlichen Mittelwerte von 14.4 bis hin zu 31 mm Mt⁻¹ vom originalen Datensatz ab. Die Unsicherheit bei einer Abweichung von 31 mm Mt⁻¹ bei einer durchschnittlichen monatlichen Niederschlagssumme im Januar von 138.8 mm Mt⁻¹ beträgt demnach 22.3 %. Anhand der Differenzen ist ebenfalls ersichtlich, dass die Unsicherheiten im Winterhalbjahr deutlich grösser sind als im Sommerhalbjahr.

Die Veränderung der Niederschlagswerte mit der Höhe beziehungsweise Distanz zu Einsiedeln entsprechen beinahe den Abbildungen der originalen Zeitreihen. Der einzige Unterschied besteht in der Abschwächung der Neigung der Trendlinien, was zu einer geringeren Korrelation zwischen Höhe und Niederschlagswerten beziehungsweise Distanz und Niederschlagswerten führt. Bei der Begutachtung der mittleren Anzahl Regentage sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den originalen und den kompletten Datensätzen ersichtlich. Die Anzahl Regentage pro Jahr weist während der Untersuchungsperiode eine leichte, aber nicht signifikante Tendenz auf.

Während der Zeitperiode von 1968 bis 1984 ergeben sich grosse Niederschlagsereignisse mit Tagessummen von über 100 mm d⁻¹ am 31.07.1977 und am 25.07.1984 (Tab. 31). Zwei weitere grosse Ereignisse erfolgten im Sommer 1978 und im Winter 1979. Niederschlagsarme Episoden sind oftmals im Herbst oder im Winter anzutreffen. Für die Stationen FRI B und ZWA B wurden die höchsten Tagesmittelwerte errechnet. Der Totalisator, welcher den geringsten Niederschlag innerhalb der Untersuchungsperiode gemessen hat, ist im oberen Bereich des Etterenbachgebiets installiert und erhält im Durchschnitt 5.5 mm d⁻¹ Niederschlag. Im Vergleich zu den originalen Niederschlagsdaten haben sich die maximalen Tagesniederschlagswerte bei einigen Messstationen erhöht; grosse Zunahmen sind bei den Stationen aufgetreten, welche kurze Zeitreihen aufgewiesen haben. Der Tagesmittelwert hat sich mit Ausnahme der Niederschlagsmessstation VOG A und ZWA B zwischen 0.1 bei der Station VOB B und LUM A und 0.6 mm d⁻¹ beim Totalisator GAM B erhöht.

Tabelle 31: Maximale Niederschlagsmengen und das dazugehörige Datum des Ereignisses sowie der Tagesmittelwert aller Messstationen für die Zeit von 1968 bis 1984.

Variable	Max. [mm d⁻¹]	Datum des Max.	\bar{X} [mm d⁻¹]
VOG A	123.4	25.07.84	6.0
VOG B	114.0	25.07.84	5.7
LUM A	104.5	31.07.77	6.1
LUM B	96.5	31.07.77	5.9
FRI B	109.9	31.07.77	6.4
BUZ B	101.8	25.07.84	5.8
GAM A	96.5	31.07.77	5.6
GAM B	123.2	25.07.84	6.0
ETT A	113.0	31.07.77	5.5
ETT B	96.3	31.07.77	6.0
ZWA A	129.4	25.07.84	6.0
ZWA B	155.5	25.07.84	6.4
ERL A	115.6	25.07.84	6.2
ERL B	119.6	25.07.84	6.1

4.2.2.1 Gebietsniederschläge

Nach dem Vergleich der Zeitreihen der einzelnen Messstationen erfolgt nun der Vergleich der Gebietsniederschläge, welche, wie im Methodenteil (Kap. 3.2.1.1) beschrieben, mit der Thiessen-Polygon-Methode berechnet wurden und einen Eingabeparameter des HBV-Modells darstellt.

Aufgrund der Kastendiagramme der jährlichen Niederschlagssummen aller Einzugsgebiete lassen sich die jährlichen Niederschlagsdaten gut und übersichtlich vergleichen.

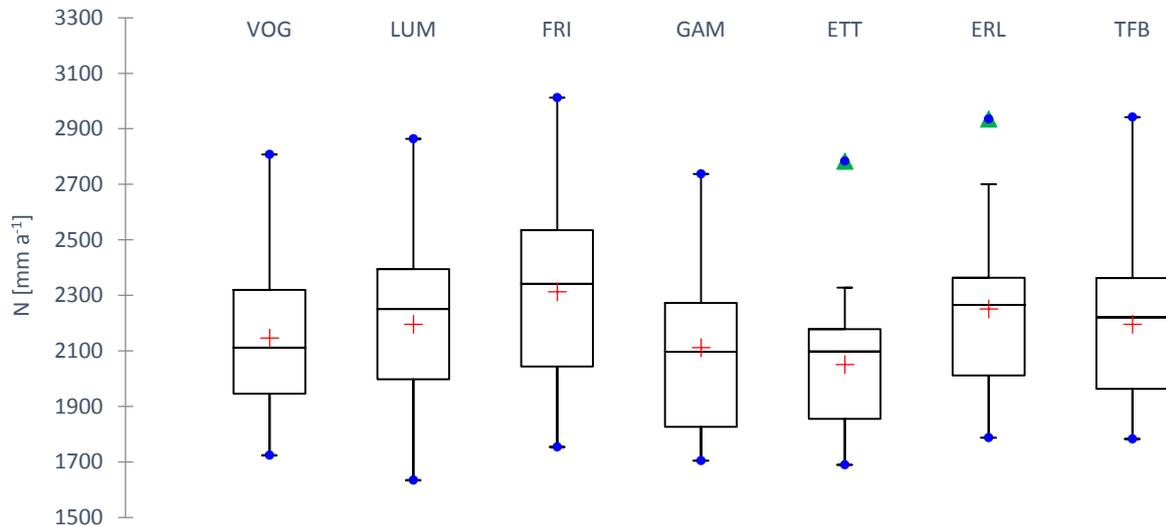


Abbildung 40: Kastendiagramme der jährlichen Gebietsniederschlagssumme der untersuchten Einzugsgebiete im südlichen Alptal von 1968 bis 1984: Niederschlag (N), Mittelwert (Kreuz), Ausreisser (Dreieck), Min/Max (Kreis).

Die höchsten Niederschlagssummen wurden für das Gebiet des Frifangbachs mit durchschnittlichen 2300 mm a^{-1} geschätzt. Ebenfalls im Frifangbachgebiet wurde die maximale Niederschlagssumme mit knapp 3000 mm a^{-1} im Jahr 1981 gemessen. Aufgrund des hohen Maximums besitzt die Zeitreihe der Jahreswerte des Einzugsgebiets des Frifangbachs die grösste Amplitude aller untersuchten Einzugsgebiete. Zusätzlich besitzt das Frifangbachgebiet eine enorme Streuung der Niederschlagsdaten. Die Kastendiagramme des Lämpenen-, Erlenbach- und Teufbachgebiets weisen auf ein ähnliches jährliches Niederschlagsverhalten hin. Sie besitzen Mittelwerte von etwa 2200 , Maximalwerte von etwa 2900 und Minimalwerte von etwa 1700 mm a^{-1} . Die drei Gebiete mit den geringsten jährlichen Niederschlagssummen sind die Gebiete des Vogelbachs, Gämschbachs und des Etterenbachs mit Werte um 2100 mm a^{-1} . Die Ausreisser stellen die Maximalwerte der Gebiete des Etterenbachs und des Erlenbachs dar, welche sich beide im niederschlagsreichen Jahr 1981 ereigneten (Abb. 40). Die genauen Jahresmittelwerte der Einzugsgebiete sind in der Tabelle 32 ersichtlich.

Tabelle 32: Jahresmittelwerte der Gebietsniederschläge von 1968 bis 1984.

	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
N [mm a⁻¹]	2146.2	2195.3	2313.3	2112.0	2051.1	2251.0	2195.6

Die Verläufe der Gebietsniederschlagszeitreihen sind beinahe identisch mit den Zeitserien der Messstationen der Abbildung 38. Während der Untersuchungsperiode waren die Jahre 1970, 1974 und 1981 am niederschlagsreichsten. Geringe Niederschlagssummen ereigneten sich in den Jahren 1971, 1972 und 1983. Ausserdem ist anhand der Verläufe ersichtlich, dass das Gebiet des Frifangbachs meist die höchsten Niederschlagswerte aufweist und die Gebiete des Gämsch- sowie des Etterenbachs die geringsten Summen aufzeigen.

In der Abbildung 41 ist die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung der Einzugsgebiete von 1968 bis 1984 ersichtlich. Die maximalen Niederschläge ereigneten sich in allen Gebieten im Winter mit Summen bis über 500 mm Mt⁻¹. Das Minimum hingegen variiert von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet zwischen Sommer, Frühling und Herbst und auch in der Summen von 360 bis 440 mm Mt⁻¹. Die grösste Schwankung der maximalen Niederschlagssummen besitzt das Gebiet des Vogelbachs, welches hohe Summen im Frühling und Winter aufweist (Abb. 41a). Im Sommer wurde im Durchschnitt 240 mm Mt⁻¹ Niederschlag gemessen während in den anderen drei Jahreszeiten nur je 165 mm Mt⁻¹ Niederschlag gefallen ist. Sonst sind keine nennenswerten Unterschiede bei der Betrachtung der mittleren Niederschlagssumme zwischen den Untersuchungsgebieten und deren Niederschlagseigenschaften erkennbar (Abb. 41b). Die geringsten minimalen Niederschlagssummen ereigneten sich in allen Einzugsgebieten im Winter und das Maximum mit Ausnahme des Vogel-, Gämsch und Frifangbachs im Frühling. Die minimalen Niederschläge variieren von maximal 40 mm Mt⁻¹ im Vogelbach- und Gämschbachgebiet bis fast 100 mm Mt⁻¹ im Teufbach- und dem Erlenbachgebiet. Im Frühling, Herbst und Winter haben alle Gebiete einen etwa gleich grossen minimalen Niederschlag mit um die 50 mm Mt⁻¹, beziehungsweise 20 mm Mt⁻¹ (Abb. 41c).

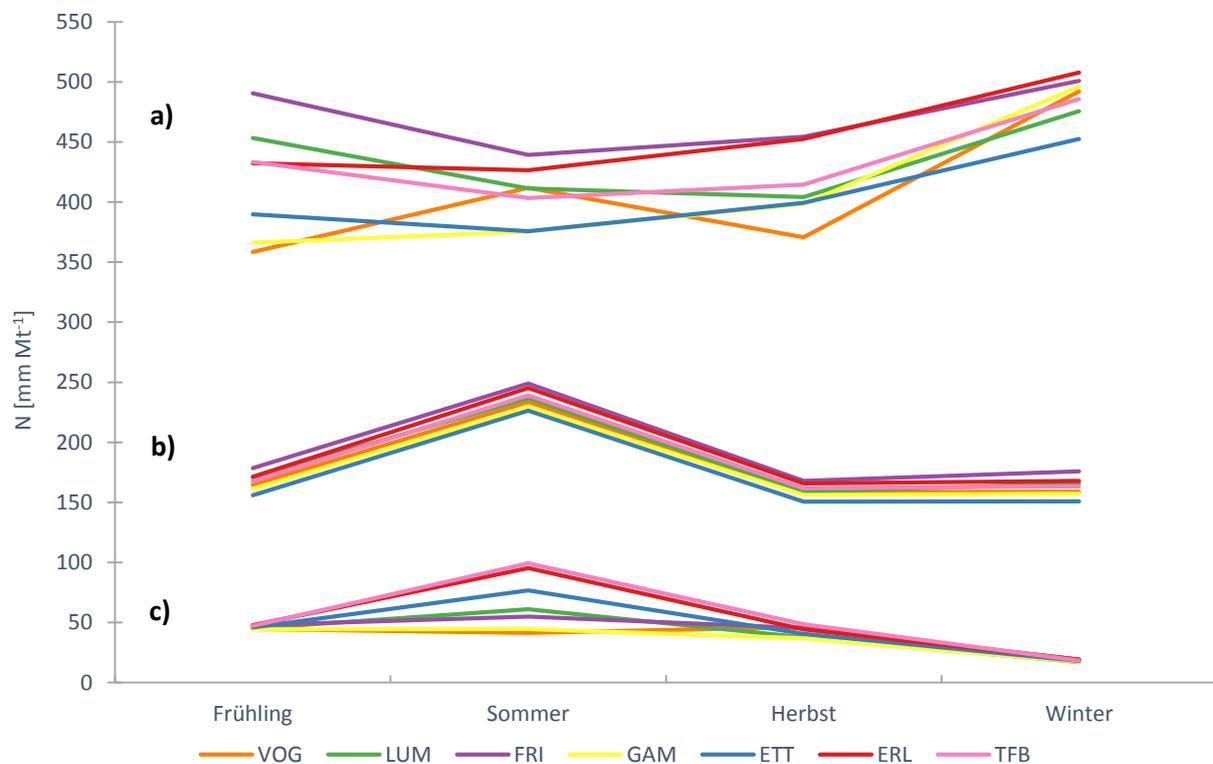


Abbildung 41: Maximale (a), mittlere (b) und minimale (c) Niederschlagssummen innerhalb der Jahreszeiten aller Einzugsgebiete während dem Zeitraum von 1968 bis 1984: Niederschlag (N).

Die Abbildung 42 bezieht sich auf die monatliche Niederschlagsverteilung, um die Niederschlagssummen genauer zu analysieren und monatliche Unterschiede, beziehungsweise Gemeinsamkeiten zwischen den Einzugsgebieten festzustellen.

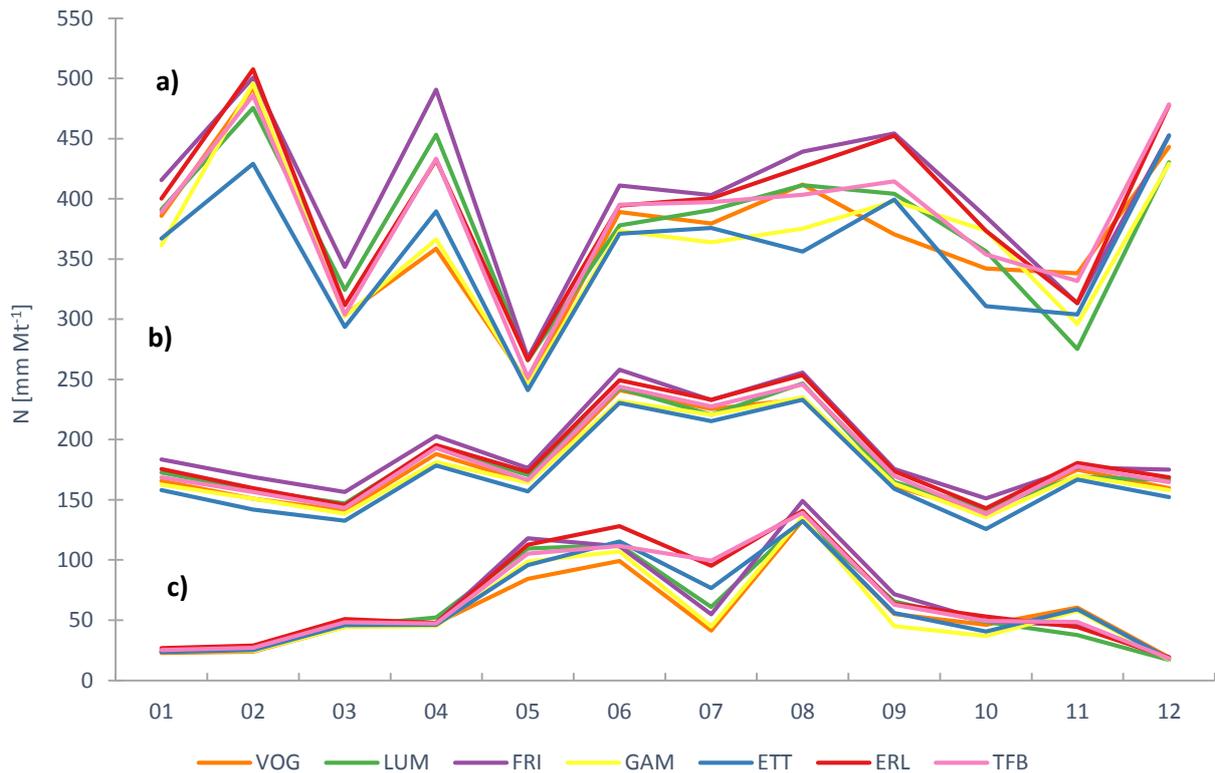


Abbildung 42: Maximale (a), mittlere (b) und minimale (c) Monatssummen der untersuchten Einzugsgebiete im Alptal von 1968 bis 1984: Niederschlag (N).

Die Verläufe der maximalen monatlichen Niederschlagssummen (Abb. 42a) der Gebiete sind weniger ähnlich zueinander als die mittleren und minimalen Monatssummen. Die Jahresverläufe zeigen zwei bis vier Spitzen, je nachdem welche Gebiete man in Betracht zieht. Die grössten maximalen Niederschlagswerte wurden im Februar und Dezember mit bis zu 500 mm Mt^{-1} gemessen. Die regenärmsten monatlichen Spitzenniederschläge ereigneten sich im Monat Mai mit ungefähr 250 mm Mt^{-1} . Die Abbildung 42b zeigt den sehr ähnlichen Verlauf der mittleren Monatssummen. Der Unterschied liegt bei maximalen 40 mm Mt^{-1} zwischen dem Einzugsgebiet des Frifangbachs und demjenigen des Etterenbachs. Die grössten Niederschlagssummen sind für Juni und August berechnet worden mit Werten über 250 mm Mt^{-1} . Die geringsten Werte verzeichneten die Monate Oktober und März mit weniger als 150 mm Mt^{-1} . Die Jahresverläufe der minimalen Monatssummen (Abb. 42c) sind wiederum ähnlich zueinander, die grössten Schwankungen zwischen den Einzugsgebieten sind während den Monaten Mai, Juni und Juli zu beobachten. Die grössten Spitzen sind in den Monaten Mai, Juni und August zu verzeichnen mit Werten von über 140 mm Mt^{-1} . Die tiefsten Werte mit unter 20 mm Mt^{-1} wurden für den Dezember berechnet.

Der höchste Tageswert ereignete sich im Gebiet des Vogelbachs am 25.07.1984 mit 120 mm d^{-1} . Ein weiteres grosses Niederschlagsereignis ereignete sich am 31.07.1977. Im Vogelbachgebiet hat es, wie im Durchschnitt aller Einzugsgebiete, an 2940 Tagen geregnet, was einem Prozentsatz von 47.3 % entspricht. Die Anzahl an trockenen und nassen Tagen variiert unter den Einzugsgebieten zwischen 3255 und 3288 beziehungsweise 2922 und 2955 Tagen. Da sich die Differenz von maximal 33 Tage sich auf eine Zeitspanne von 17 Jahren bezieht, ist der Unterschied vernachlässigbar. Die höchste tägliche Durchschnittsniederschlagsrate hat das Gebiet des Frifangbachs mit 6.3 mm a^{-1} . Die geringste Rate liegt bei 5.8 mm d^{-1} und wurde im Gämschbachgebiet gemessen (Tab. 33).

Tabelle 33: Statistische Kennzahlen der Tageswerte der Gebietsniederschläge von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{X}), Trockentag = <0.5 [mm d⁻¹] Niederschlag, Regentag = ≥ 0.5 [mm d⁻¹] Niederschlag.

Statistik	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
Max. [mm d ⁻¹]	119.5	101.0	108.5	102.5	109.5	115.0	107.5
\bar{X} [mm d ⁻¹]	5.9	6.0	6.3	5.8	5.6	6.1	6.0
Min. [mm d ⁻¹]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Anz. Trockentage	3270	3266	3255	3277	3288	3279	3257
Anz. Regentage	2940	2944	2955	2933	2922	2931	2953

4.3 Modellierte Zeitreihen

In einem ersten Schritt werden im Kapitel 4.3 die Abflusszeitreihen der verschiedenen Bäche verglichen und den originalen Datensätzen gegenübergestellt. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die Modellgüte der Abflusskalibrierungen diskutiert. Daraufhin folgen die Analysen der Wasserbilanzen der untersuchten Gebiete und die Synthesen der unterschiedlichen Parameterausprägungen des HBV-Modells.

4.3.1 Abflussdaten

Die Kastendiagramme (Abb. 43) der jährlichen Abflusssummen zeigen statistische Eckdaten und geben einen guten Überblick über die jährlichen Abflussraten der Einzugsgebiete im südlichen Alptal.

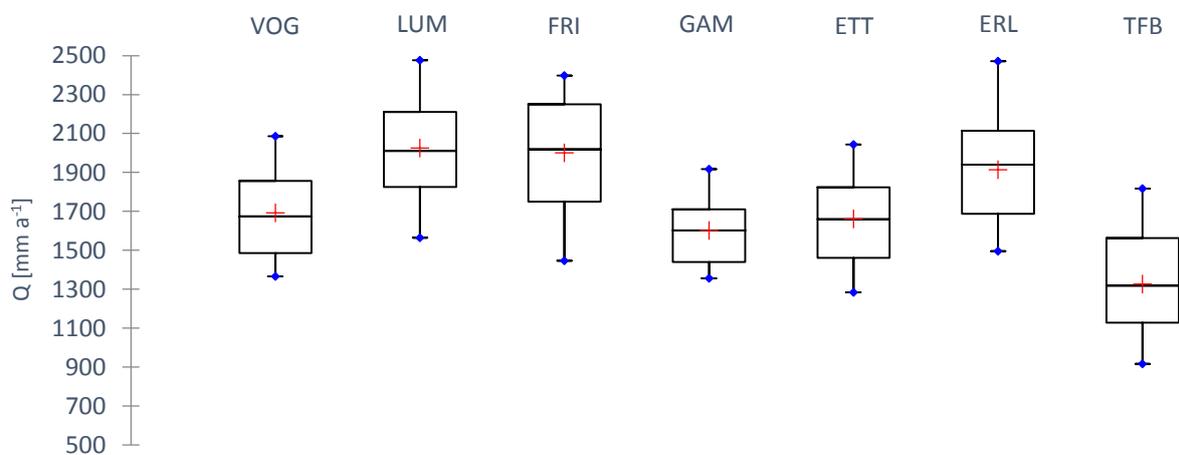


Abbildung 43: Überblick über die modellierten Jahresabflussraten anhand von Kastendiagrammen über die gesamte Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984: Abfluss (Q), Arithmetischer Mittelwert (Kreuz), Min/Max (Kreis).

Die statistischen Kennwerte (Tab. 34) beziehungsweise Kastendiagramme (Abb. 40) der modellierten Abflussraten des Lümpenen-, Frifang- und Erlenbachs sind sich relativ ähnlich. Es werden Abflussmittelwerte zwischen 1900 und 2030 mm a⁻¹ modelliert und die jährlichen Abflussdaten weisen eine grosse Streuung auf. Es gibt demnach grosse Unterschiede zwischen dem simulierten Minimum und Maximum innerhalb der Zeitperiode von 1968 bis 1984, was zu einer hohen Standardabweichung führt. Der Vogel-, Gämisch- und Etterenbach weisen hingegen ähnliche mittlere jährliche Abflussmengen auf. Ihr Minimum liegt bei ungefähr 1300 mm a⁻¹ und ihr Maximum bei 2000 mm a⁻¹, somit ist die Differenz zwischen Minimum und Maximum um einiges geringer als bei den zuvor erwähnten drei Ge-

bieten. Der Teufbach weist mit einem Mittelwert von knapp über 1300 mm a⁻¹ einen deutlich geringeren durchschnittlichen Jahresmittelwert auf. Die genauen statistischen Kennzahlen zu den Kastendiagrammen sind in der Tabelle 34 enthalten.

Tabelle 34: Statistische Eckdaten zu den modellierten jährlichen Abflussmengen der untersuchten Einzugsgebiete (Abb. 40): Arithmetischer Mittelwert (\bar{X}), Standardabweichung (σ).

Variable	Max. [mm a⁻¹]	\bar{X} [mm a⁻¹]	Min. [mm a⁻¹]	σ [mm a⁻¹]
VOG	2086.6	1692.6	1365.4	221.3
LUM	2476.9	2026.1	1563.7	280.3
FRI	2397.3	2000.9	1446.8	293.9
GAM	1917.3	1602.8	1355.9	183.1
ETT	2043.8	1660.5	1284.6	231.4
ERL	2472.3	1913.7	1495.1	263.9
TFB	1817.7	1327.1	916.3	278.0

Den grössten durchschnittlichen Abfluss wurde für den Lümpenenbach mit 2026 mm a⁻¹ und einem Maximum von fast 2500 mm a⁻¹ berechnet. Einen beinahe gleich hohen Mittelwert besitzt der Frifangbach mit 2001 mm a⁻¹ und einem Maximum von knapp 2400 mm a⁻¹. Auch für den Erlenbach wurde eine durchschnittliche Abflussrate von 1914 mm a⁻¹ für die Periode von 1968 bis 1984 simuliert. Das Minimum sowie das Maximum mit Werten von 1500 und 2500 mm a⁻¹ sind vergleichbar mit den zwei bereits besprochenen Einzugsgebieten. Die simulierten Abflusssummen des Vogel-, Gämsch- und Eterebachs sind im Mittel um ungefähr 330 mm a⁻¹ geringer als bei den anderen Einzugsgebieten. Neben dem Mittelwert sind ebenfalls die minimalen und maximalen Abflussraten, sowie die Standardabweichung geringer als diejenigen des Lümpenen-, Frifang und Erlenbachs. Die grössten Unterschiede bezüglich den statistischen Kennwerten hat der Teufbach mit dem geringsten Maximum, Mittelwert und Minimum aufzuweisen.

In der Abbildung 44 werden die simulierten jährlichen Abflusswerte sowie die durchschnittlichen Jahresniederschläge aller Einzugsgebiete über die Zeitperiode von 1968 bis 1984 aufgezeigt um die Abflüsse der Einzugsgebiete anhand des zeitlichen Verlaufs zu vergleichen und abflussreiche, sowie abflussarme Jahre zu identifizieren.

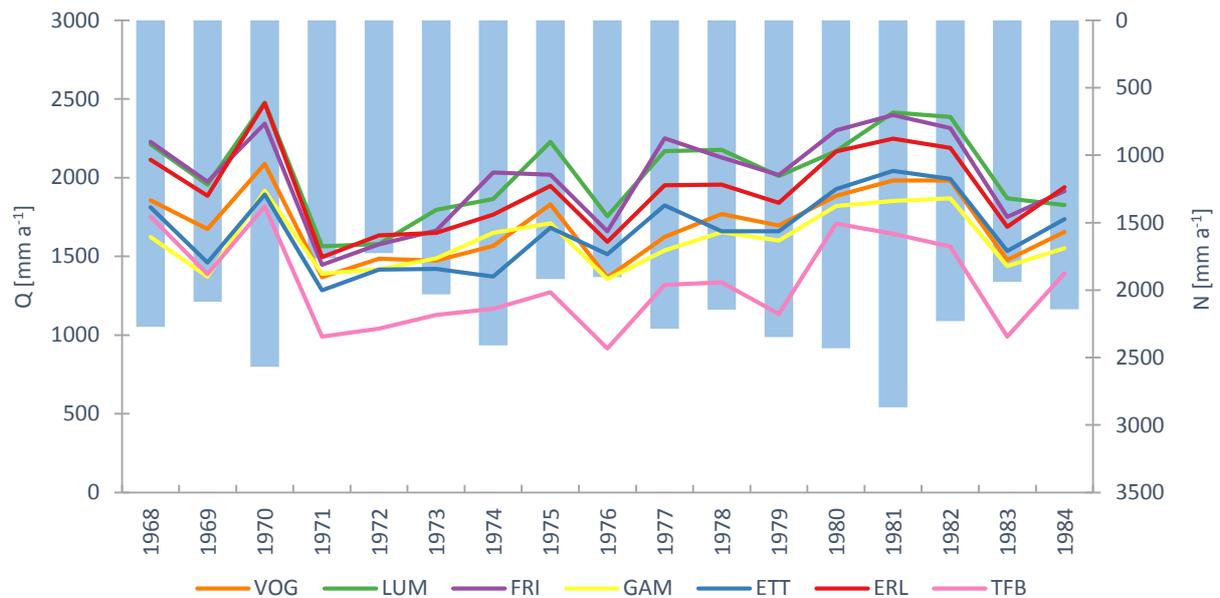


Abbildung 44: Modellierte Abflusszeitreihen sowie die durchschnittlichen Jahresniederschläge aller Einzugsgebiete für die Untersuchungsperiode 1968 bis 1984 aller untersuchten Bäche: Abfluss (Q), Niederschlag (N).

Die modellierten Abflusszeitreihen der untersuchten Bäche verlaufen über die gesamte Untersuchungsperiode ähnlich. Die abflussreichsten Jahre sind 1970, 1981 und 1982 mit durchschnittlichen Abflusssummen von über 2000 mm a^{-1} . In den Jahren 1971, 1972, 1973 und 1976 wurden eher geringe Abflusssummen mit Werten unter 1600 mm a^{-1} simuliert. Ausserdem zeigt die Abbildung 44 wiederum, dass der Lümpenen- und Frifangbach, gefolgt vom Erlenbach, die grössten jährlichen Abflusssummen aufweisen. Die geringsten jährlichen Abflüsse wurden mit Ausnahme des Teufbachs je nach Jahr für den Gämschbach oder den Etterenbach geschätzt. Des Weiteren ist in der Abbildung 41 gut sichtbar, dass der Jahresabfluss stark vom Jahresniederschlag abhängig ist. In den Jahren mit hohen Niederschlagssummen wie 1970 und 1981 verzeichnen alle Einzugsgebiete auch hohe Abflusssummen.

Die Abbildung 45 zeigt die Zunahme der durchschnittlichen jährlichen Abflusssummen der originalen und modellierten Zeitreihen und ihre Trendlinien. Beide Trendlinien visualisieren einen positiven nicht signifikanten Trend, wobei der Trend der originalen Zeitserie mit einer Zunahme von 38 mm a^{-1} deutlich grösser ist als die Zunahme der modellierten Zeitreihen mit 8 mm a^{-1} .

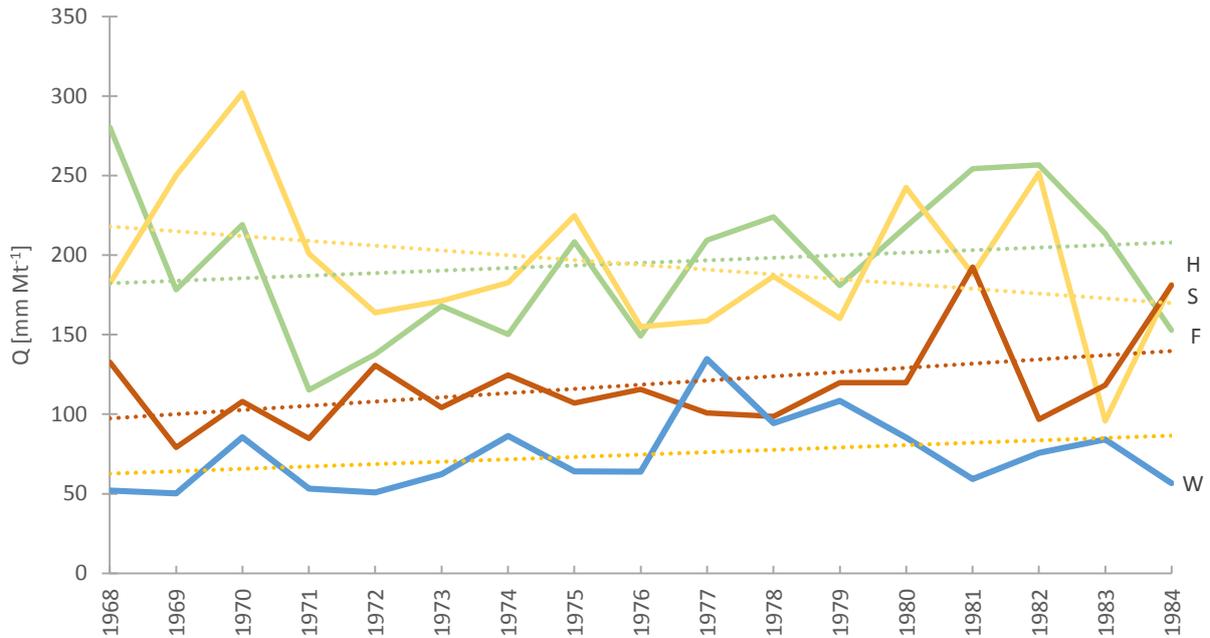


Abbildung 45: Vergleich der durchschnittlichen monatlichen Abflusssummen der vier Jahreszeiten in den Jahren von 1968 bis 1984 sowie ihre Trendlinien: originaler Datensatz (gestrichelt), modellierter Datensatz (modelliert), Trendlinien (gepunktet).

Die Sommerabflüsse haben während der Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 nicht signifikant abgenommen. Die Abflüsse im Frühling, Herbst und Winter haben hingegen leicht, aber nicht signifikant zugenommen, wobei die Zunahme im Herbst am grössten war mit 2.5 mm a^{-1} . Hohe Sommerabflüsse ereigneten sich im Jahr 1970 und sehr tiefe im Jahr 1983. Im Herbst gab es in den Jahren 1981 und 1984 relativ hohe Abflusssummen mit ungefähr 185 mm Mt^{-1} . Im Frühling gab es ein Minimum in Bezug auf die monatliche Abflusssumme im Jahr 1971.

Um die jährliche Verteilung der Abflussmengen besser zu verstehen und zu analysieren, werden in der Abbildung 46 die durchschnittlichen Monatsabflusssummen der untersuchten Bäche sowie die durchschnittlichen Jahresniederschläge aller Einzugsgebiete der gesamten Untersuchungsperiode aufgezeigt.

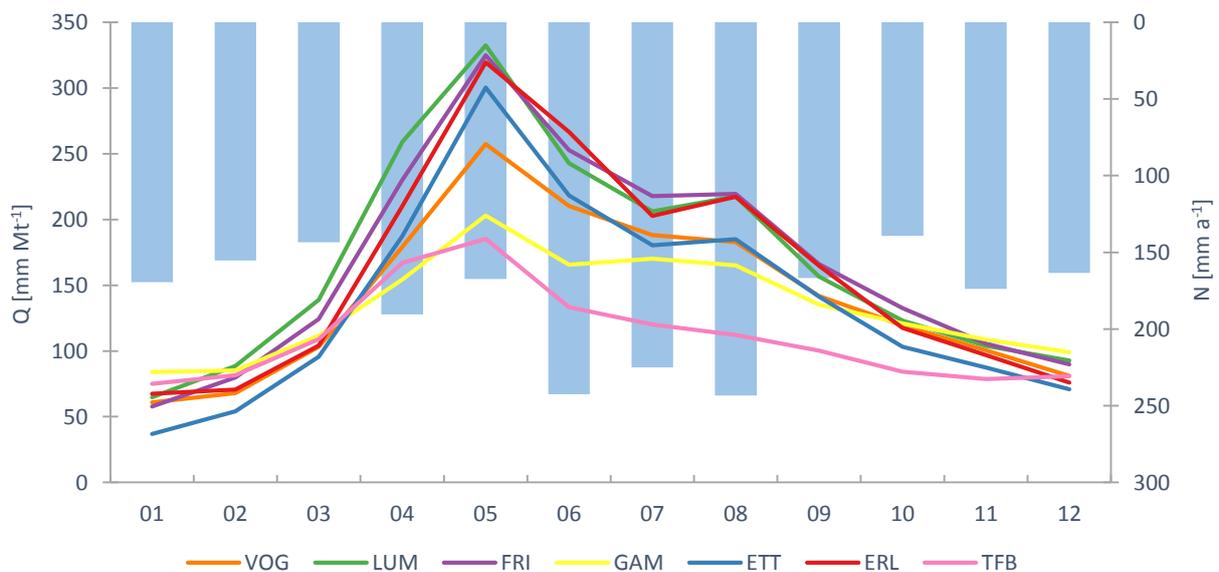


Abbildung 46: Durchschnittliche monatliche Abflussraten sowie die durchschnittlichen Jahresniederschläge aller Einzugsgebiete der Bäche von 1968 bis 1984 im südlichen Alptal: Abfluss (Q), Niederschlag (N).

Die grössten Abflusssummen wurden in allen Bächen im südlichen Alptal im Frühling gemessen, genauer gesagt im Mai mit einer monatlichen Spitze von über 300 mm Mt⁻¹. Im Frühling besitzen die abflussreichsten Bäche im südlichen Alptal wie der Lümpenen-, Frifang- und Erlenbach zirka drei- bis viermal mehr Abfluss als im Winter. Mit dem Beginn des Winters im Oktober wurden mit 120 mm Mt⁻¹ deutlich geringere Abflussraten berechnet. Die geringsten Abflusssummen ereigneten sich im Januar mit Werten zwischen 25 und 75 mm Mt⁻¹. In der Periode von Mai bis Januar nimmt die Abflussmenge bei allen Bächen stetig ab mit Ausnahme des leichten Anstiegs der Abflussrate im Monat August. Die geringste Differenz in der Abflussmenge zwischen Frühling und Sommer hat der Gämschbach gefolgt vom Vogelbach und dem Teufbach. Grosse Unterschiede sind beim Lümpenen-, Frifang- und Erlenbach erkennbar. Des Weiteren ist in der Abbildung 46 erkennbar, dass die monatliche Abflussmenge neben der monatlichen Niederschlagssumme auch von der Schneeschmelze abhängig ist. Die hohe Abflusssumme im Mai entstammt nämlich nicht nur der mit 170 mm Mt⁻¹ eher durchschnittlichen Niederschlagsmenge sondern auch von der Schneeschmelze. Jedoch sind die hohen Abflüsse im Sommer durchaus auf die hohen monatlichen Niederschlagssummen zurückzuführen und nicht mehr auf die Schneeschmelze. Bei den Niederschlägen im Frühling und Herbst sind die Lufttemperaturen massgebend, ob der Niederschlag als Regen fällt und abfließt oder als Schnee eine Decke bildet.

Die maximalen monatlichen Abflusssummen von 1968 bis 1984 der untersuchten Bäche zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die modellierten mittleren Monatssummen, jedoch auf einem höheren Niveau. Für den Mai wurde der mit Abstand höchste Abflusswert, mit einem Maximum im Frifangbach von über 800 mm Mt⁻¹ geschätzt. Im Juli, August und September sind die Summen dann konstant bei 360 mm Mt⁻¹, bevor es im Winterhalbjahr deutlich geringere maximale Abflusswerte hat. Die minimalen Monatswerte verhalten sich im Vergleich zu den maximalen und mittleren Monatsabflusssummen komplett anders. Die grössten minimalen Abflussraten ereigneten sich je nach Bach im April, Mai, Juni und August. Im Juli war eine starke Abnahme der minimalen Summen erkennbar. Ausserdem zeigten die Abflussraten des Gämschbachs fast keine saisonalen Schwankungen und die höchsten Niedrigwasserabflüsse mit Werten von 2 bis 2.5 mm d⁻¹ konnten auch beim Gämschbach gemessen werden. Ausser den tiefen Werten im Juli, wurden die geringen minimalen Abflussraten hauptsächlich in den Wintermonaten gemessen. Der Gämschbach hat zudem mit Ausnahme des Jahres 1974 immer die geringsten maximalen Abflusswerte aufgewiesen.

Die höchsten Tagesabflussraten stammen meist aus dem Erlenbach mit einem Maximum von über 88 mm d⁻¹ im Jahr 1984 (Tab. 35). Der geringste Basisabfluss wurde für den Etterenbach, gefolgt vom Erlenbach mit durchschnittlichen Werten unter 1 mm d⁻¹ simuliert. Die arithmetischen Mittelwerte widerspiegeln nochmals die modellierten Abflussraten der sieben untersuchten Bäche. Hohe Abflussraten mit 5.5 mm d⁻¹ wurden mit Hilfe des HBV-Modells für den Lümpenen- und Frifangbach geschätzt. Die geringste tägliche Abflussrate mit 3.6 mm d⁻¹ weist der Teufbach auf.

Tabelle 35: Statistische Kennwerte der Tagesabflussdaten von 1968 bis 1984: Mittelwert (\bar{x}).

Variable	Max. [mm d⁻¹]	\bar{x} [mm d⁻¹]	Min. [mm d⁻¹]
VOG	54.2	4.6	1.4
LUM	61.8	5.5	1.4
FRI	63.0	5.5	1.2
GAM	33.6	4.4	2.0
ETT	51.0	4.5	0.7
ERL	88.3	5.2	1.0
TFB	37.3	3.6	1.6

Die Korrelationsmatrix der sieben Bäche zeigt wie ähnlich, beziehungsweise verschieden die Abflusszeitreihen sind (Tab. 36).

Tabelle 36: Korrelationsmatrix nach Spearman der Abflusszeitreihen der untersuchten Bäche.

Variablen	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
VOG	<i>1</i>	<i>0.808</i>	<i>0.895</i>	<i>0.941</i>	<i>0.912</i>	<i>0.755</i>	<i>0.630</i>
LUM	<i>0.808</i>	<i>1</i>	<i>0.879</i>	<i>0.739</i>	<i>0.901</i>	<i>0.855</i>	<i>0.706</i>
FRI	<i>0.895</i>	<i>0.879</i>	<i>1</i>	<i>0.870</i>	<i>0.949</i>	<i>0.741</i>	<i>0.582</i>
GAM	<i>0.941</i>	<i>0.739</i>	<i>0.870</i>	<i>1</i>	<i>0.856</i>	<i>0.671</i>	<i>0.586</i>
ETT	<i>0.912</i>	<i>0.901</i>	<i>0.949</i>	<i>0.856</i>	<i>1</i>	<i>0.790</i>	<i>0.625</i>
ERL	<i>0.755</i>	<i>0.855</i>	<i>0.741</i>	<i>0.671</i>	<i>0.790</i>	<i>1</i>	<i>0.814</i>
TFB	<i>0.630</i>	<i>0.706</i>	<i>0.582</i>	<i>0.586</i>	<i>0.625</i>	<i>0.814</i>	<i>1</i>

Werte in Kursiv sind von Null verschieden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha=0.05$

Sehr hohe Korrelationen mit einem Wert von über 0.9 haben die Zeitserien des Vogel- und Gämschbachs, Vogel- und Etterenbachs, Lümpepen- und Etterenbachs und Frifang- und Etterenbachs. Tiefe Korrelationen mit einem Wert unter 0.7 weisen der Gämsch- und Erlenbach, sowie beinahe alle Korrelationen in Bezug auf den Teufbach auf.

Die Abbildung 47 widerspiegelt das Abflussverhalten im Hochsommer des Jahres 1968. Es ist ersichtlich, dass der Gämsch- und Teufbach auf grosse Niederschlagsereignisse nur sehr geringe Abflussreaktionen zeigen, während der Abfluss in den anderen Gebiet als Reaktion auf ein starkes Regenereignis schnell ansteigt, aber auch schnell wieder zurückgeht. Sehr hohe Abflusssummen erreichen der Frifang- und Erlenbach.

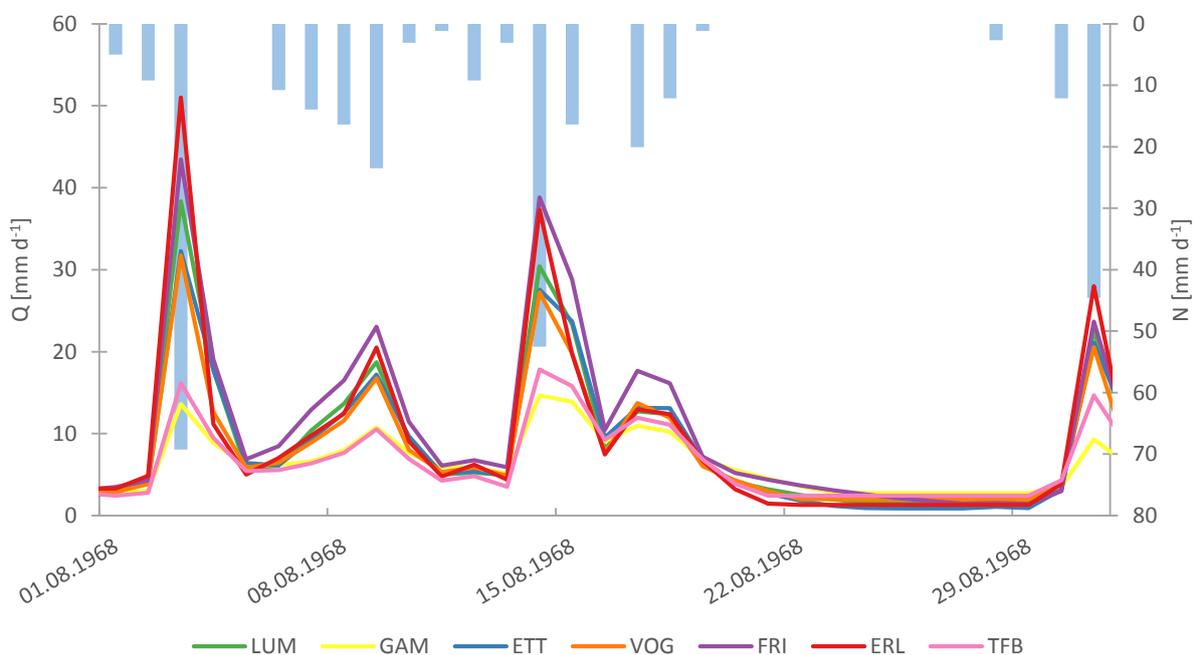


Abbildung 47: Abflussverhalten im Sommer 1968 aller Einzugsgebiete sowie der durchschnittliche Niederschlag: Abfluss (Q), Niederschlag (N).

Die Abbildung 48 zeigt das Abflussverhalten während der Ausaperung zwischen April und Ende Mai im Jahr 1968, sowie den durchschnittlichen Niederschlag und die Lufttemperatur. Mit dem Anstieg der Lufttemperatur über 0 °C Mitte April beginnt die Schneeschmelze. Der Frifangbach zeigt einen sehr starken Anstieg der Abflussrate zu Beginn der Ausaperung, welche durch zusätzlichen Niederschlag

noch verstärkt wird. Der Gämsch- und Teufbach zeigen nach einem relativ starken Anstieg der Abflusskurve zu Beginn der Schneeschmelze einen im Vergleich zu den anderen Bächen schnellen Rückgang der Abflussrate.

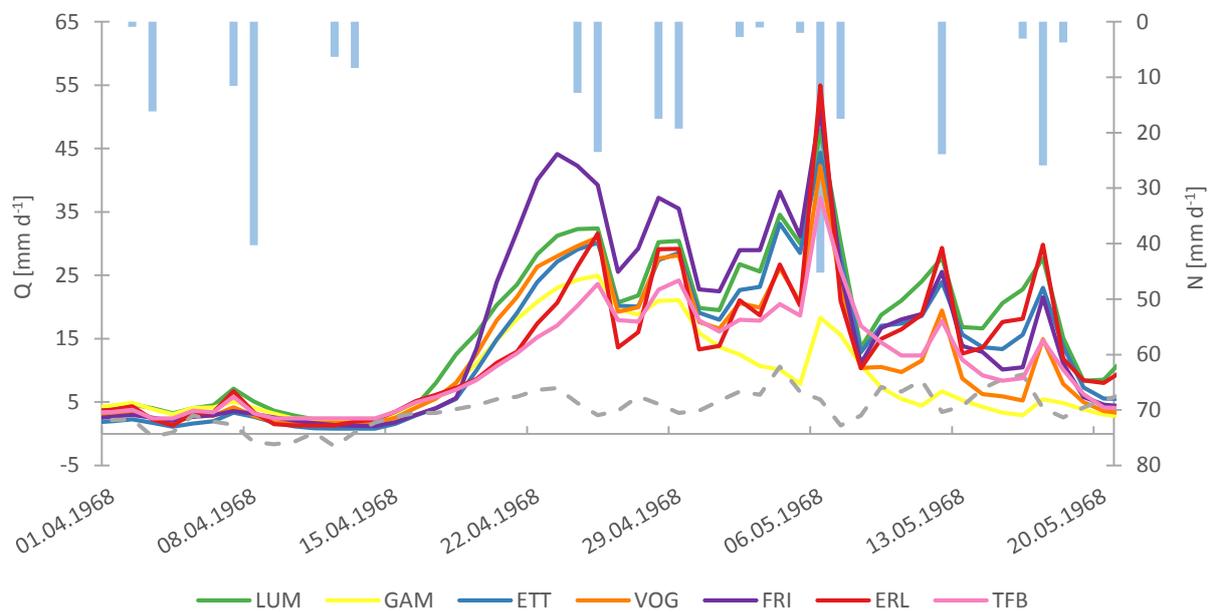


Abbildung 48: Abflussverhalten während der Schneeschmelze 1968 aller Einzugsgebiete sowie der durchschnittliche Niederschlag und Lufttemperatur: Abfluss (Q), Niederschlag (N).

In der Abbildung 49 ist die Abflussdynamik während den Wintermonaten Februar und März des Jahres 1968, sowie die durchschnittliche Niederschlagssumme und Lufttemperatur ersichtlich. Aufgrund der kalten Lufttemperaturen fällt der Niederschlag als Schnee und eine Schneedecke wird aufgebaut, weshalb der Abfluss kleiner ausfällt. In dieser Zeit herrschen in allen Einzugsgebieten Niedrigwasserzustände, in welchen nur der Basisabfluss abfließt. Der Gämsch- und Teufbach zeigen den grössten Abfluss über den Winter, gefolgt vom Vogel- und Lämpenenbach. Die geringste

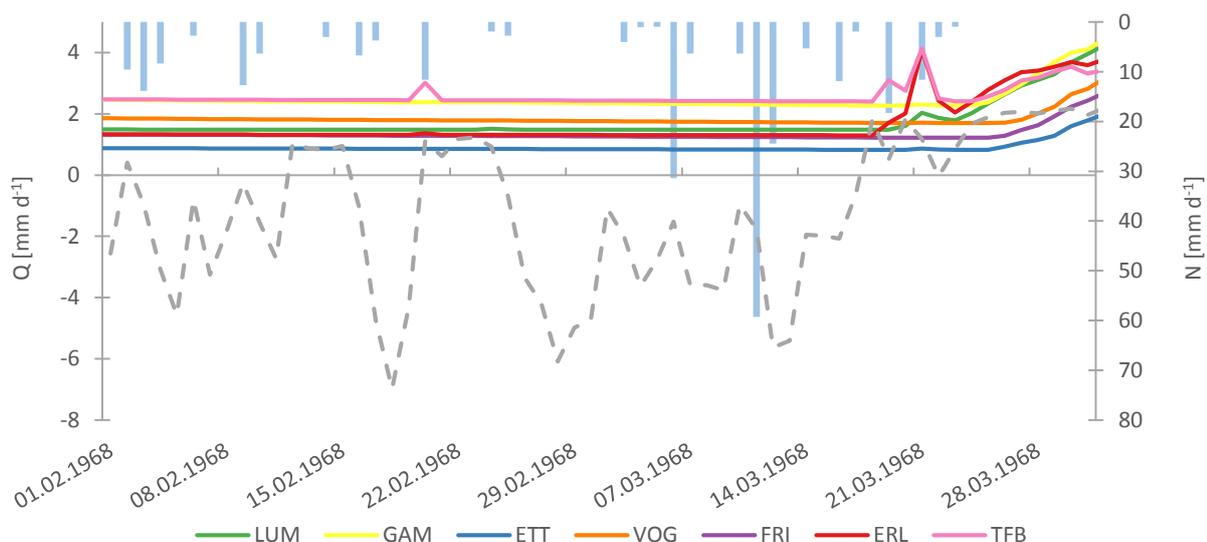


Abbildung 49: Abflussverhalten im Winter 1968 aller Einzugsgebiete sowie der durchschnittliche Niederschlag und Lufttemperatur: Abfluss (Q), Niederschlag (N).

Die tiefste Abflussrate im Winter scheint der Etterenbach zu besitzen. Die erste Erhöhung der Abflussrate ist im Frühjahr im Erlen- und Teufbach ersichtlich.

Die nächsten Abbildungen erlauben einen Vergleich zwischen den originalen und den modellierten Zeitreihen in Bezug auf die Jahres- und Monatsabflusssummen (Abb. 50-52).

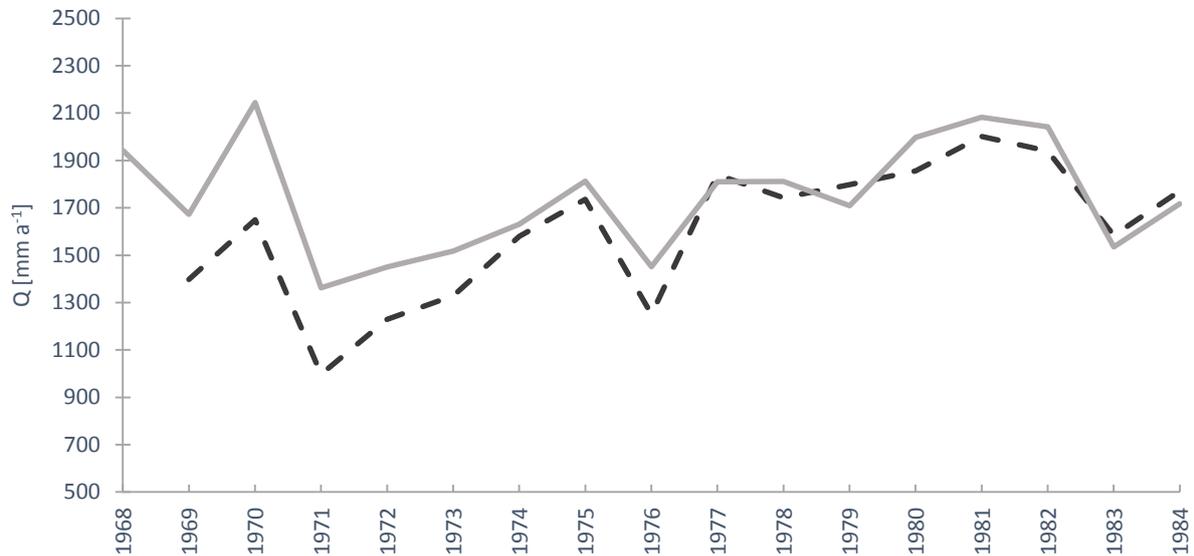


Abbildung 50: Vergleich der durchschnittlichen, jährlichen Abflusssummen zwischen den originalen und modellierten Datensätzen aller Einzugsgebiet von 1968 bis 1984: Abfluss (Q), originale Zeitreihe (gestrichelt), modellierte Zeitreihe (durchgezogen).

Bis ins Jahr 1973 besitzen die Abflusskurven der originalen und modellierten Daten einen Versatz von ungefähr 300 mm a^{-1} , wobei die modellierten Daten höhere Abflusssummen aufweisen (Abb.50). Eine Ausnahme bildet das Jahr 1968, da kein originaler durchschnittlicher Jahreswert aufgrund mangelnder Daten vorhanden ist. Für die restlichen Jahre der Untersuchungsperiode verlaufen die Zeitreihen relativ ähnlich mit einem Mittelwert von 1750 mm a^{-1} über die ganze Periode.

Anhand der Abbildung 51 ist ersichtlich, dass die modellierten Abflussdaten generell ein wenig zu hoch geschätzt wurden. Aber grundsätzlich wurden die jährlichen Abflusssummen des Vogel-, Lämpfen-, Etteren- und Erlenbach ziemlich gut simuliert. Die Daten des Frifang- sowie des Gämshbaches wurden über die gesamte Untersuchungsperiode viel zu hoch geschätzt. Auch die Übereinstimmung der Daten des Teufbachs ist nicht befriedigend, denn diese Daten wurden manchmal zu hoch und manchmal zu niedrig geschätzt.

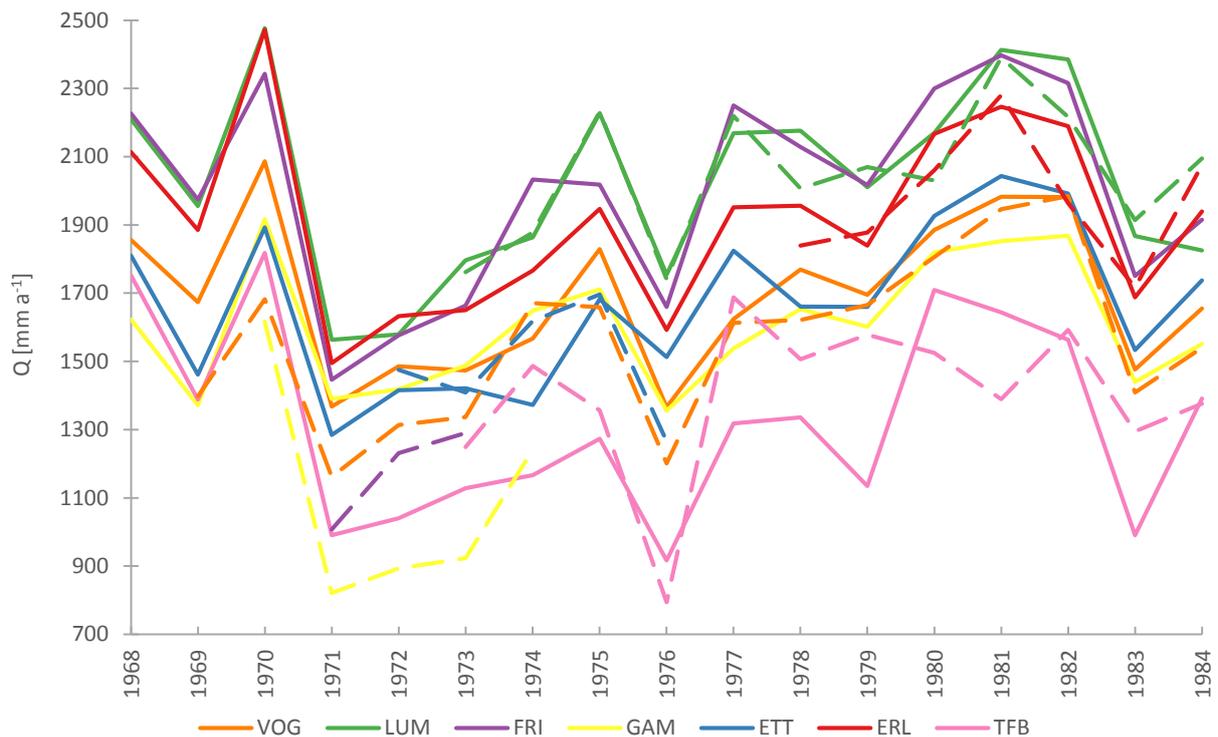


Abbildung 51: Vergleich der jährlichen Abflusssummen aller untersuchter Einzugsgebiete zwischen den originalen und modellierten Datensätzen von 1968 bis 1984: Abfluss (Q), originale Zeitreihe (gestrichelt), modellierte Zeitreihe (durchgezogen).

Die modellierten und originalen Zeitreihen der mittleren monatlichen Abflussraten (Abb. 52) stimmen gut überein mit Ausnahme der Monate Juni, Juli, August und September, in welchen die modellierten Daten ungefähr 20 bis 50 mm Mt^{-1} mehr Abfluss haben. Die grösste Differenz zwischen den Zeitreihen ist im August und die geringste im April. Ausserdem ereignen sich die höchsten Abflussraten im Mai mit 280 mm Mt^{-1} und die tiefsten mittleren Abflusswerte in den Wintermonaten von November bis Februar.

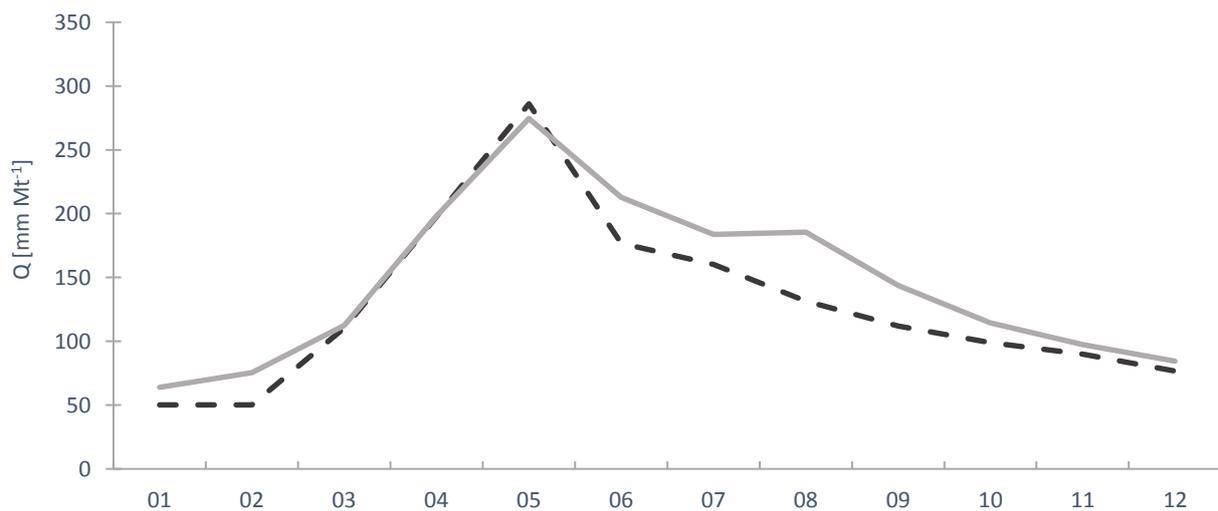


Abbildung 52: Vergleich der mittleren, monatlichen Abflusssummen zwischen den originalen und modellierten Datensätzen von 1968 bis 1984: Abfluss (Q), originale Zeitreihe (gestrichelt), modellierte Zeitreihe (durchgezogen).

Die originalen und modellierten Zeitreihen des Vogel-, Lümpenen-, Etteren- und Erlenbachs verlaufen ähnlich wie die Kurven der mittleren Monatssummen in der Abbildung 46. Die grössten Differenzen zwischen den originalen und modellierten Datensätzen im Vogelbach sind im Mai und während den Sommermonaten, wobei die Abflüsse durch das Modell im Mai um 1.5 mm d^{-1} unterschätzt und die im Sommer um 1.3 mm d^{-1} überschätzt werden (Tab. 37). Gute Übereinstimmungen finden sich im Januar, Februar, März und Juni, mit Differenzen von unter 0.5 mm d^{-1} . Beim Lümpenenbach ist die Differenz im Mai mit 2.5 mm d^{-1} noch höher als beim Vogelbach. Die modellierten Werte für die Monate Juni und August sind im Lümpenenbach mit 1.6 mm d^{-1} auch deutlich zu hoch berechnet worden. Eine geringe Differenz ($< 0.5 \text{ mm d}^{-1}$) zwischen den originalen und modellierten Abflussdaten ist im Juli und von September bis Januar ersichtlich. Die Unterschiede bezüglich den originalen und modellierten monatlichen Abflusswerten im Frifang- und Gämschbachs sind anders. Die Abflussraten werden durch die Modellierung mit dem HBV-Modell im Vergleich zu den originalen Daten stets überschätzt mit einer maximalen Differenz von 4.1 mm d^{-1} im Mai, beziehungsweise 2.1 mm d^{-1} im September. Die beste Übereinstimmung der zwei Kurven ist im November respektive im Mai ersichtlich mit Differenzen von 0.5 mm d^{-1} und 0.7 mm d^{-1} . Die grösste Ähnlichkeit zwischen den originalen und modellierten durchschnittlichen, monatlichen Tageswerten weist der Etterenbach auf. Der einzige grosse Unterschied ist im Juni mit einer Differenz von 2.0 mm d^{-1} erkennbar. Die Monate Dezember bis Mai werden mit einem Unterschied welcher geringer als 0.5 mm d^{-1} simuliert. Die Abflussdaten des Erlenbachs wurden im März und Mai mit einer Differenz von 1.8 und 1.9 mm d^{-1} zu niedrig geschätzt. Im August wurde die Abflussrate jedoch mit einer Differenz von 2.1 mm d^{-1} deutlich zu hoch simuliert. Geringe Unterschiede sind im September, Dezember, Januar, Februar und Juli auszumachen. Mit Ausnahme des Gämschbachs werden die Einzugsgebiete für das Winterhalbjahr deutlich besser geschätzt als für das Sommerhalbjahr, wobei die modellierten Werte gegenüber den Originalen im Sommer eher unterschätzt und im Winter überschätzt werden.

Tabelle 37: Differenzen zwischen den originalen und den modellierten monatlichen Tagesabflussraten aller Einzugsgebiete von 1968 bis 1984: Arithmetischer Mittelwert (\bar{x}).

Monat	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB	\bar{x}
Jan	-0.3	-0.2	-0.9	-1.6	0.2	-0.1	-0.2	-0.4
Feb	-0.3	-0.9	-2.1	-1.9	-0.2	-0.4	-0.5	-0.9
Mrz	0.2	1.0	-1.1	-2.3	-0.3	1.8	0.3	-0.1
Apr	0.8	1.2	-3.1	-1.0	0.1	0.6	1.3	0.0
Mai	1.5	2.5	-4.1	-0.7	-0.3	1.9	1.7	0.4
Jun	0.0	-1.6	-2.9	-0.8	-2.0	-1.1	-0.3	-1.2
Jul	-1.3	0.0	-2.4	-0.9	0.0	-0.4	-0.5	-0.8
Aug	-1.5	-1.6	-2.9	-1.8	-1.4	-2.1	-1.0	-1.7
Sep	-1.1	-0.1	-3.0	-2.1	-1.1	0.3	-0.3	-1.1
Okt	-0.9	0.4	-2.0	-1.7	-0.9	0.8	0.8	-0.5
Nov	-0.8	0.0	-0.5	-0.9	0.5	-0.6	0.5	-0.3
Dez	-0.5	-0.1	-1.1	-0.8	-0.2	0.4	0.5	-0.3
\bar{x}	-0.4	0.1	-2.2	-1.4	-0.5	0.1	0.2	

4.3.2 Modellgüte der Abflusssimulationen

Die Modellgüte wird anhand verschiedener Gütemasse, wie zum Beispiel die gewählte Zielfunktion gemäss Lindström, dargestellt (Kapitel 3.2.9). Die Modellgüte vergleicht die beobachteten und die geschätzten Abflusswerte und drückt die Ähnlichkeit beziehungsweise Unterschiede der Zeitreihen in Form einer Zahl zwischen $-\infty$ und 1 aus. Die Zahl 1 signalisiert eine perfekte, und negative Werte eine schlechte Übereinstimmung. Eine Ausnahme ist der Volumenfehler, bei welchem das Umgekehrte gilt. In der Tabelle 38 sind die Resultate der Kalibrierungsergebnisse der untersuchten Bäche im südlichen Alptal abgebildet.

Tabelle 38: Kalibrierungsergebnisse der Abflusssimulationen der untersuchten Bäche von 1968 bis 1984 anhand verschiedener Gütemasse: Bestimmtheitsmass (R^2), Modelleffizienz (R_{eff}), Effizienz für Basisabflüsse ($\log R_{\text{eff}}$), Volumenfehler (VF), mittlere Differenz (MD), Lindström-Mass (LM), Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (r_s).

Modellgüte	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
R^2	0.64	0.68	0.83	0.64	0.67	0.80	0.00
R_{eff}	0.63	0.68	0.73	0.50	0.67	0.80	-0.35
$\log R_{\text{eff}}$	0.45	0.64	0.58	-0.01	0.60	0.70	-0.45
MD [mm a^{-1}]	-124.41	0.00	-358.10	-472.22	-15.86	0.00	146.59
VF	0.92	1.00	0.70	0.57	0.99	1.00	0.89
LM	0.62	0.68	0.70	0.45	0.67	0.80	-0.37
r_s	0.69	0.81	0.86	0.76	0.82	0.82	-0.03

Die Modellgüte der gewählten Zielfunktion (Lindström-Mass) ist mit Ausnahme des Teufbachs akzeptabel mit Werten von 0.45 bis 0.80. Eine gute Übereinstimmung mit dem Lindström-Mass von 0.8 zwischen den beobachteten und simulierten Abflussdaten berechnet das HBV-Modell mit den Daten des Erlenbachs. Für den Frifang-, Vogel-, Lümpenen- und Etterenbach resultiert nach dem Lindström-Mass eine Modellgüte von 0.70 bis 0.62. Der Gämschbach hat mit einer Modellgüte von 0.45 ein eher schlechtes Kalibrierungsergebnis vorzuweisen. Aus den Daten des Teufbachs resultiert ein negativer Wert, was auf falsche Eingabedaten schliessen lässt. Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman widerspiegelt die Ähnlichkeit der beobachteten und simulierten Zeitreihen der einzelnen Bäche. Der Lümpenen-, Frifang-, Etteren- und Erlenbach weisen hohe Rangkorrelationen mit Koeffizienten von über 0.8 auf. Der Rangkorrelationskoeffizient ist bei dem Vogel- und dem Gämschbach geringer, jedoch immer noch relativ hoch mit Werten von 0.69 und 0.76. Aus dem Volumenfehler beziehungsweise der mittleren Differenz ist ersichtlich wie stark sich die beobachteten und simulierten Abflusssummen unterscheiden. Je grösser die mittlere Differenz, desto mehr nähert sich der Volumenfehler 0. Für den Lümpenen- und Erlenbach hat die Kalibrierung keinen Volumenfehler zwischen den beobachteten und simulierten Abflusszeitreihen ergeben, somit besitzen beide Bäche eine mittlere Differenz von 0 mm a^{-1} . Der Unterschied zwischen den originalen und simulierten Abflussdaten des Etterenbachs beträgt -16 mm a^{-1} bei einem Volumenfehler von 0.99. Das Kalibrierungsergebnis des Vogelbachs weist eine mittlere Differenz von -124 mm a^{-1} und ein Volumenfehler von 0.92 auf. Die kalibrierte Abflusskurve des Frifang- sowie des Gämschbachs besitzt einen deutlich grösseren Volumenfehler mit 0.70 beziehungsweise 0.57, was sich auch in den mittleren Differenzen von -358 und -472 mm a^{-1} widerspiegelt. Die Über- beziehungsweise Unterschätzung des Abflusses hat grosse Auswirkungen auf die Wasserbilanz des jeweiligen Einzugsgebiets (Kapitel 4.3.3). Die Modellgüte nach Nash-Sutcliffe (R_{eff}), welche eher auf die Modellierung von Spitzenabflüssen ausgerichtet ist, verhält sich sehr ähnlich wie die Kalibrierungsergebnisse gemäss dem Lindström-Mass. Ebenfalls ähnliche Werte erzielt das Bestimmtheitsmass (R^2). Das Gütemass R^2 erzielt bei der Kalibration der Abflüsse im Frifang- sowie im Gämschbach bessere Resultate als die Modellgüte nach Lindström. Das logarithmische Gütemass ($\log R_{\text{eff}}$), welches

ein Mass für die Modellierung des Basisabflusses darstellt, weist Werte von -0.01 bis 0.70 auf. Die Werte sind allesamt tiefer als diejenigen des Lindström- und R_{eff} -Gütemasses. Aus diesem Grund werden die Hoch- und Mittelwasserabflüsse besser simuliert als die Niedrigwasserabflüsse. Besonders stark gilt dies für das Gämischbachgebiet, wo der Wert des $\log R_{\text{eff}}$ bei -0.01 liegt (Tab. 38).

4.3.3 Wasserbilanzen der Einzugsgebiete

Anhand der inter- und extrapolierten Niederschlags- und Temperaturdaten sowie die, durch das HBV-Modell komplettierten Abflussdaten erfolgt die Erstellung von langjährigen Wasserbilanzen der sieben untersuchten Einzugsgebiete im südlichen Alptal. Die Tabelle 39 zeigt die langjährigen, mittleren Jahressummen des Abflusses, Niederschlags, und Verdunstung der untersuchten Gebiete.

Tabelle 39: Langjährige mittlere Abfluss-, Niederschlags- und Verdunstungssummen für die sieben untersuchten Einzugsgebiete im Zeitraum von 1968 bis 1984. In Bezug auf die Abflusssummen sind einerseits die simulierten und andererseits die beobachteten Abflusssummen dargestellt. In Bezug auf die Verdunstungssummen werden einerseits die aktuelle und andererseits die potentielle Verdunstung abgebildet: Summe (Σ), Abfluss (Q), Niederschlag (N), aktuelle Evaporation (E_a), potentielle Evaporation (E_p).

Wasserbilanz	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
ΣQ_{sim}	1691.2	2024.46	1999.3	1601.5	1659.2	1912.2	1326.0
ΣQ_{beo}	1550.6	2031.5	1195.4	1098.0	1496.4	1935.5	1376.6
ΣN	2163.7	2191.3	2310.6	2108.4	2050.2	2245.4	2194.0
ΣE_a	197.6	173.1	202.5	199.1	187.5	208.8	796.1
ΣE_p	222.6	237.8	225.6	217.4	217.9	306.8	991.1

Die Niederschlagssummen der untersuchten Einzugsgebiete variieren zwischen 2050 mm a⁻¹ im Etterenbachgebiet bis zu 2311 mm a⁻¹ im Gebiet des Frifangbachs (Tab. 39). Die beobachteten Abflusssummen zeigen grosse Unterschiede, wobei die geringen Summen in den Gebieten Frifang- und Gämischbach sowie die sehr hohen Abflusswerte im Lämpenenbachgebiet auffallend sind. Alle Einzugsgebiete mit Ausnahme des Teufbachs weisen ähnliche Verdunstungssummen mit einem Durchschnitt der aktuellen Evaporation von 195 mm a⁻¹ auf. Die potentielle Verdunstungssumme liegt im Schnitt bei 238 mm a⁻¹, wobei die grösste Verdunstung das Gebiet des Lämpenenbachs aufweist. Die Werte des Teufbachs mit beinahe 800, respektive 1000 mm a⁻¹ für die aktuelle, beziehungsweise potentielle Evaporation ist im Vergleich zu den anderen Einzugsgebieten im südlichen Alptal sehr hoch.

Die modellierte Abflusssumme setzt sich aus drei konzeptionellen Abflussteilen zusammen: dem Abfluss aus der obersten Bodenzone, dem Abfluss aus der oberen Grundwasserbox und dem Abfluss aus der unteren Grundwasserbox (Abb. 12). Die untersuchten Einzugsgebiete weisen eine unterschiedliche Verteilung der drei Abflussanteile auf (Abb. 53). Der schnelle Abfluss aus der obersten Bodenzone liegt in den Gebieten Gämisch-, Erlen- und Teufbach unter 10 % des Gesamtabflusses. Hingegen weist das Lämpenen- und Frifangbachgebiet einen Anteil von beinahe 30 % auf. Ein hoher Abflussanteil aus der oberen Grundwasserbox besitzt das Erlenbachgebiet mit 72 %, sowie das Etterenbachgebiet mit 55 %. Eher einen geringen Anteil weist das Gebiet des Gämischbachs mit 32 % auf. Der langsamste Abfluss aus der unteren Grundwasserbox hat seinen grössten Anteil im Gämischbachgebiet mit 60 % des Gesamtabflusses. Des Weiteren besitzen das Teuf- und Vogelbachgebiet hohe Anteile mit 50 beziehungsweise 40 %.

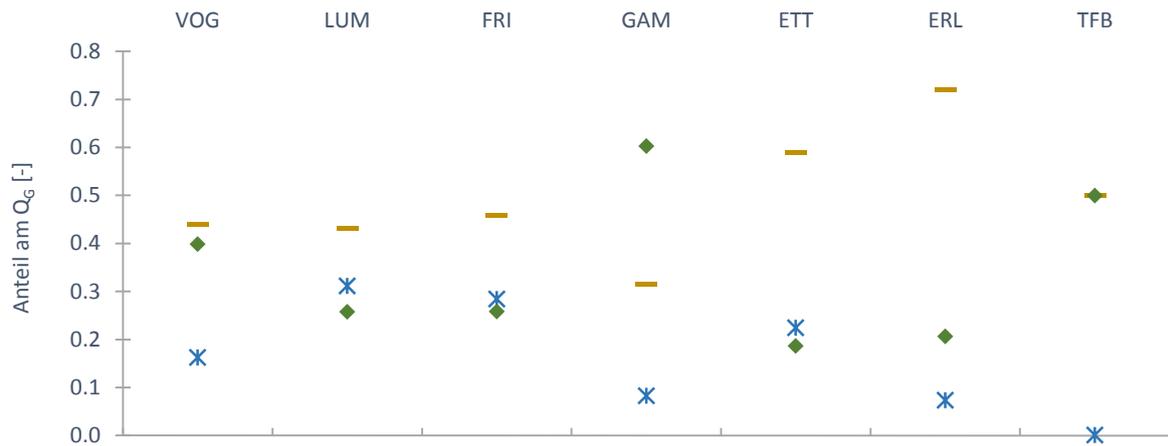


Abbildung 53: Übersicht über die verschiedenen Abflussanteile am Gesamtabfluss der sieben untersuchten Bäche: Gesamtabfluss (Q_G), Anteil aus der obersten Bodenzone (Stern), Anteil aus der oberen Grundwasserbox (Strich), Anteil aus der unteren Grundwasserbox (Viereck).

4.3.4 Unterschiedliche Parameterausprägungen bei der Modellierung der Abflussdaten

Gute Übereinstimmungen zwischen den beobachteten und simulierten Abflussdaten sind mit Ausnahme des Gämsch- und des Teufbachs in allen Bächen gegeben, mit einem Gütemass gemäss Lindström von über 0.62 (Tab. 38). Gute Kalibrierungsergebnisse werden für jedes Einzugsgebiet, beziehungsweise jeden Bach mit tausenden Parametersets erreicht. Die Parameterausprägung für die beste Übereinstimmung zwischen den beobachteten und simulierten Abflüssen (Gütemass) ist von Bach zu Bach unterschiedlich. Für die meisten Parameter wurden gute Simulationen innerhalb einer grossen Spannweite gefunden. Einige Parameter waren besser definiert und variieren innerhalb einer geringen Spannweite (Abb. 54). Jedoch kann jeder Parameterwert in ein schlechter Übereinstimmung resultieren aufgrund der Werte von anderen Parametern. Die Parametersets der Schneeroutine, CFMAX und der Wellenablaufoutine, MAXBAS sind mehr oder weniger in allen Kalibrierungsergebnissen der untersuchten Bäche gut definiert.

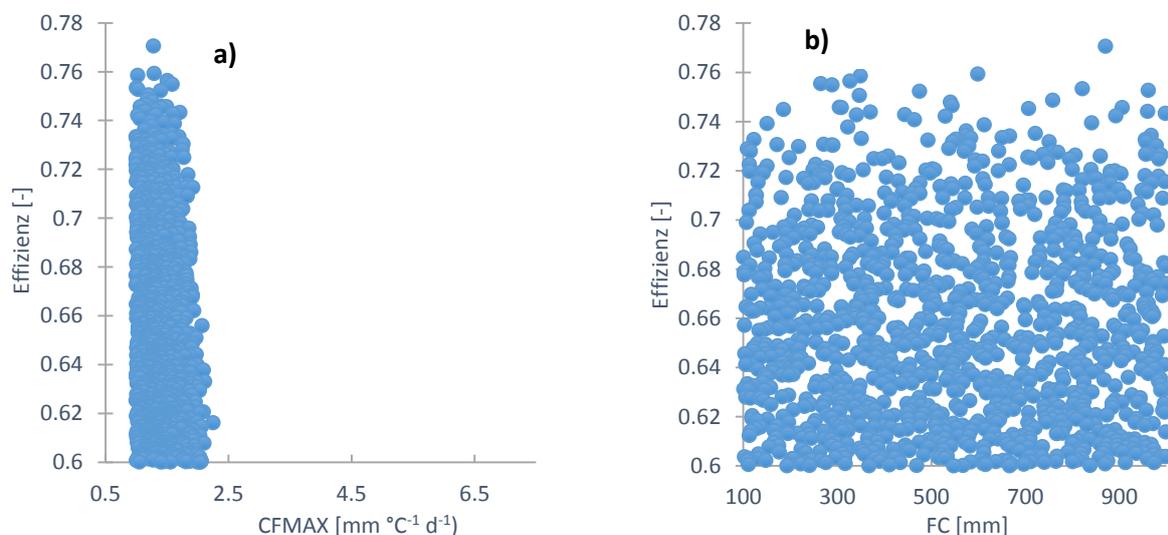


Abbildung 54: Resultate von zwei Modellparametern des Erlenbachs nach 20000 Modellläufen (jeder Punkt repräsentiert einen Modelllauf): (a) CFMAX als ein Beispiel eines gut definierten Parameter und (b) FC für ein Beispiel eines schlecht definierten Parameter.

Zwischen den Bächen gibt es ebenfalls grosse Unterschiede bezüglich den Parameterausprägungen aus den Kalibrierungsergebnissen (Tab. 40). Auffallend ist die grosse Perkolationsrate des Gämschbachgebiets mit 4.7 mm d^{-1} , welche deutlich höher ist als bei den anderen Gebieten. Des Weiteren ist der Schwellenwert UZL des Frifangbachgebiets und des Teufbachgebiets mit Werte von 32.5 und 56.3 mm um einiges höher im Vergleich zu den anderen Einzugsgebieten. Bezüglich den Rezessionskoeffizienten K0 fällt derjenige des Gämschbachs und des Teufbachs ab mit Werten von 0.16 beziehungsweise 0.15 d^{-1} . Ausserdem weist der Lümpenen- und der Frifangbach hohe K0 Werte auf mit über 0.5 d^{-1} . Bemerkenswert ist die Zunahme des Rezessionskoeffizienten K1 im Vergleich zu K0 beim Erlenbach und Teufbach auf den Wert von 0.5 beziehungsweise 0.4 d^{-1} . Der kleinste Wert des Parameterwerts K2 besitzt der Lümpenenbach mit dem Minimum von 0.00005. Bei MAXBAS sind keine nennenswerten Unterschiede erkennbar bei einer Kalibrierungsspannweite von 1 bis 5 d. Die Parameterwerte bezüglich C_{et} liegen, mit Ausnahme des Erlenbachgebiets mit 0.1, beim maximalen Wert von $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Der Schwellenwert der Temperatur variiert von 0.18 im Lümpenenbachgebiet bis zum Minimum von $-2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ im Gämschbachgebiet. Ein ebenfalls geringer Schwellenwert weist das Gebiet des Erlenbachs mit -0.15 auf. Der Parameter CFMAX hat hohe Werte im Frifang- und Gämschbachgebiet sowie tiefe Werte im Erlenbachgebiet. Der Schneekorrekturfaktor zeigt, mit Ausnahme des hohen Wertes im Lümpenenbachgebiet mit 0.84, durchschnittliche Werte mit einer geringen Spannweite von 0.5 bis 6.3 an. Die grössten Unterschiede sind beim Parameter FC ersichtlich, die Spannweite reicht von 100 bis 1000 mm. In Bezug auf die beste Übereinstimmung der beobachteten und simulierten Abflussdaten besitzt der Erlenbach einen sehr tiefen Wert für den Parameter FC und der Lümpenen- und Gämschbach einen hohen Wert. Der Bodenroutine Parameter LP ist für das Resultat der Kalibrierung des Lümpenenbachgebiets sehr hoch mit beinahe 1. Ansonsten liegen die Werte beim Minimum von 0.3. Der Form-Koeffizient BETA ist tief im besten Parameterset des Lümpenenbachgebiets und hoch bei den Kalibrierungsergebnissen des Gämsch- und Erlenbachs.

Tabelle 40: Übersicht der Parameterausprägungen des HBV-Modells der untersuchten Einzugsgebiete bei der Modellierung ihrer Abflussdaten.

Parameter	VOG	LUM	FRI	GAM	ETT	ERL	TFB
PERC	3.13	1.51	1.89	4.70	1.24	1.58	3.25
UZL	20.03	18.45	32.46	28.12	16.85	24.58	56.26
K0	0.34	0.57	0.53	0.16	0.39	0.35	0.15
K1	0.24	0.21	0.15	0.14	0.29	0.50	0.40
K2	0.00202	0.00005	0.00183	0.00204	0.00140	0.00056	0.00072
MAXBAS	1.00	1.47	1.31	1.00	1.46	1.13	1.00
C_{et}	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.10	0.50
TT	-0.85	0.18	-1.03	-2.00	-0.85	-0.15	-1.32
CFMAX	5.45	4.61	7.50	6.29	4.86	3.20	4.50
SFCF	0.50	0.84	0.60	0.50	0.61	0.63	0.51
FC	811.04	999.70	697.17	999.99	455.08	100.03	443.29
LP	0.30	0.99	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30
BETA	4.96	0.50	2.41	6.41	3.88	8.00	2.76

5. Interpretation und Diskussion

5.1 Originale Zeitreihen

5.1.1 Temperaturdaten

Die jährlichen Lufttemperaturmittelwerte sind abhängig von der Länge der Zeitreihen, wie im Beispiel des Gämshbachsgebiets deutlich wird (Abb. 13). Die Einzugsgebietstemperatur von 1.6 °C ergibt sich aus einem Datensatz von einem Jahr und ist somit nicht repräsentativ. Der grösste durchschnittliche Jahresmittelwert beträgt 6.1 °C und wurde im Lümpenenbachgebiet gemessen, zudem ist in diesem Gebiet die mittlere Lufttemperatur ab 1976 um 1.5 °C wärmer als im Gebiet des Vogelbachs. Der Grund für diesen Unterschied ist nicht bekannt. Möglicherweise wurde die Messstation verschoben oder das Messgerät wurde ausgetauscht. Der Durchschnitt der Jahresmittelwerte aller Einzugsgebiete im südlichen Alptal beträgt 4.7 °C für den Zeitraum von 1968 bis 1984. Die Jahresmittelwerte aus der Literatur mit 4.5 bis 5.0 °C (Keller, 1970; Keller et al., 1989; Burch, 1994) stimmen somit gut überein. Die geringen maximalen Jahrestemperaturen (Tab. 20) der Gebiete Gämsh-, Etteren- und Frifangbach lassen sich durch die relativ kalte Zeitperiode beziehungsweise kühle Sommer von 1970 bis 1974 erklären.

Die Lufttemperaturen des Vogelbachs haben grundsätzlich über die gesamte Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 ganz leicht abgenommen, wobei die Temperaturen tendenziell im Frühling und Winter abgenommen und im Sommer zugenommen haben. Im Herbst blieben die Werte konstant, wobei, wobei nur die Temperaturabnahme im Winter einen signifikanten Trend aufweist (Abb. 15). Diese Aussagen sind, mit Ausnahme derjenigen über die Wintertemperaturen, vergleichbar mit denjenigen aus dem Bericht über die Klimaszenarien der Schweiz, wobei die Ursache für diese Temperaturentwicklung der globale Klimawandel darstellt (MeteoSchweiz, 2013a). Der Grund für die Abnahme der Wintertemperaturen während der Untersuchungsperiode kann nicht mit Sicherheit begründet werden. Mögliche Ursachen sind unerwünschte anthropogene Einflüsse bei der Messung wie systematische Messfehler, welcher sich aus dem thermischen Messfehler, dem eigentlichen Messfehler des Sensors und dem Messfehler des verwendeten Messgeräts zusammensetzt. Am häufigsten führen jedoch schlecht gewählte Messorte, unzureichender Strahlungsschutz, mangelnde Belüftung der Wetterhütte und schlechte Eichung zur systematischen Über- oder Unterschätzung der Lufttemperatur. Ein besonderes Problem stellen häufige Standortwechsel von Klimastationen dar. Die Lufttemperaturmessung etwa reagiert neben Strahlungsfehlern auf Änderungen der Vegetation und Bebauung der Umgebung äusserst sensibel. Eine weitere Fehlerquelle bildet der zufällige Messfehler, zu welchen der Ablesefehler zählt, wobei es sich häufig um die sogenannten 5- beziehungsweise 10-Grad-Fehler handelt, Schreibfehler, wozu vergessene Minuszeichen zählen, sowie Digitalisierungs- und Übertragungsfehler (ZAMG, 2015). Andere Ursachen für die Abnahme der Wintertemperaturen sind die natürlichen Temperaturschwankungen aufgrund zyklischer Änderungen der Meeresströmungen, sowie kalte Winter aufgrund geringerer Einfluss der Winde, welche warme Luft bringen und die kalten Winter bis Mitte der 70er Jahre aufgrund erhöhtem Aerosolanteil in der Luft (IPCC, 2013).

Die Korrelationen zwischen den Zeitreihen widerspiegeln gut die topographische Lage der Einzugsgebiete im südlichen Alptal (Tab. 21). Das Vogelbachgebiet liegt nördlich des Frifang- und direkt gegenüber des Gämshbachgebiets, was sicherlich ein Grund für die starke Korrelation zwischen diesen Zeitreihen darstellt. Das Einzugsgebiet des Etterenbachs und dasjenige des Lümpenenbachs liegen südlicher, was die Korrelation verringern lässt. Am Ende des Alptals befindet sich das Einzugsgebiet des

Erlenbachs, mit welchem das Vogelbachgebiet die geringste Korrelation in Bezug auf die Lufttemperaturdaten aufweist. Die Korrelationen der Zeitreihen repräsentieren gut die Distanzen zwischen den jeweiligen Messstationen im südlichen Alptal.

5.1.2 Niederschlagsdaten

Der leicht positive, aber nicht signifikante Niederschlagstrend mit Zunahmen von 6.9 mm a^{-1} im Vogelbachgebiet und einer durchschnittlichen Zunahme im südlichen Alptal von 16.6 mm a^{-1} spiegelt sich auch in den Analyse von Stähli (2015) für die Niederschlagsstation in Einsiedeln (1969-2012) wider. Stähli (2015) kommt jedoch zum Schluss, dass dekadische Trends in den Niederschlagsdaten viel eindeutiger sind als die kontinuierlichen Trends über die gesamten 40 Jahre. Diese Aussage lässt sich aufgrund der kurzen Messreihe von 1968 bis 1984 nicht bestätigen.

Im Alptal ist ein Niederschlagsgefälle in Nord-Süd Richtung erkennbar (Kap. 4.1.2). Dies manifestiert sich in der Zunahme der Jahresniederschläge von Norden nach Süden: Einsiedeln 1650 mm a^{-1} (Burch, 1994), VOG B 2097 mm a^{-1} , FRI B 2196 mm a^{-1} , LUM B 2296 mm a^{-1} , ZWA B 2339 mm a^{-1} . Durch die Kessellage des Alptals verstärkt sich die Tendenz zu Starkniederschlägen am Nordfuss der Mythen. Die Totalisatoren auf dem tieferen Messniveau (B) sammeln grundsätzlich mehr Niederschlag, als diejenigen auf dem höheren Messniveau (A). Ein möglicher Grund für diese Tatsache zeigt die Abbildung 55 aus dem Bericht des Bundesamts für Wasser und Geologie (2005). Die Abnahme der Niederschläge innerhalb von 1251 bis 1500 m ü. M. ist auf die ungünstige Kombination zwischen der Lufttemperatur und dem Wassergehalt der Luft zurückzuführen.

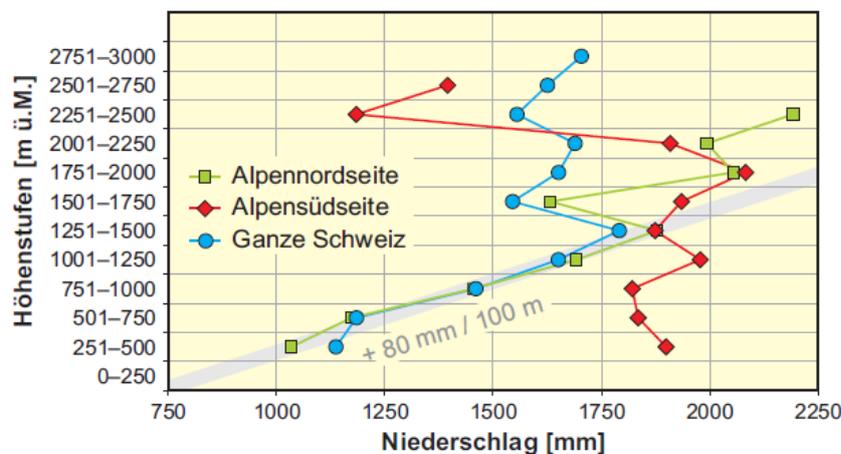


Abbildung 55: Mittlerer Jahresniederschlag der nach Höhenzonen gegliederten Gebieten für die Periode 1961 bis 1990, nach Schädler und Weingartner, 2002b) und einem linearen Niederschlagsgradienten ($+80 \text{ mm} / 100 \text{ m}$) von Kirchofer und Sevruk (1992).

Der Vergleich der jährlichen Niederschlagssummen der verschiedenen Messstationen (Tab. 22) zeigt sehr tiefe Summen für die Station ETT A und generell höhere Summen auf der westlichen Talseite. Gründe für die unterschiedlichen Niederschlagsmengen der Messstationen im südlichen Alptal sind neben dem Nord-Süd-Gefälle, der Höhe und Exposition, sicherlich auch die lückenhaften Datensätze, welche zu einer Verzerrung der Resultate und Fehlinterpretationen führen können. Möglicherweise sind aber auch Luv-Lee-Effekte sowie der Föhn, Winde und lokale Gewitter (Nisley, 2006) für die Niederschlagsunterschiede im südlichen Alptal mit verantwortlich.

Die Aussagen über die Verteilung der Niederschlagssummen innerhalb eines Jahres mit hohen Niederschlagssummen in den Sommermonaten und geringen Summen während dem Winterhalbjahr von

Burch (1994) und Hegg und Rickenmann (1998) kann anhand der originalen Niederschlagsdaten bestätigt werden (Kap. 4.1.2). Im Sommer sind die Niederschläge durch Starkniederschläge geprägt, welche oftmals durch die erhöhten Verdunstungsraten von Juni bis August verursacht werden. Die Starkniederschläge kommen andererseits ebenfalls in Verbindung mit Gewittern (Konvektion) oder im Zusammenhang mit quasi-stationären Wetterlagen mit Stauwirkungen auf (Frei und Schmidli, 2006).

Die Zunahme der Winter- und Herbstniederschläge im Vogelbachgebiet sowie die Abnahme im Frühling und Sommer zeigen keinen signifikanten Trend. Die Trends stimmen nur bedingt mit der Niederschlagsentwicklung aus dem Klimabericht Urschweiz 2013 (MeteoSchweiz, 2013b) überein, welche eine Niederschlagszunahme im Sommer und Herbst und eine Abnahme im Winter und Frühling zeigen für den Zeitraum 1864 bis 2012. Ausserdem ist entgegen dem Bericht über die Klimaszenarien der Schweiz (MeteoSchweiz, 2013a) die Abnahme der Sommerniederschläge ziemlich eindeutig. In weitergehenden Studien zur Niederschlagsentwicklung von Frei und Schmidli (2006) zeigt sich zudem, dass die Zunahme der Niederschlagssummen das Resultat einer Zunahme der Niederschlagshäufigkeit als auch der Niederschlagsintensität ist. So überrascht es nicht, dass die Niederschlagstage im südlichen Alptal um durchschnittlich 1 d a^{-1} zugenommen haben.

Die durchschnittliche Anzahl Schneefalltage liegt bei $70 \text{ d}_s \text{ a}^{-1}$. Der positive, aber nicht signifikante Trend der Schneefalltage verzeichnet für das Vogelbachgebiet eine Zunahme von $0.7 \text{ d}_s \text{ a}^{-1}$ und für das südliche Alptal eine durchschnittliche Zunahme von $1.0 \text{ d}_s \text{ a}^{-1}$ (Kap. 4.1.2). Stähli (2015) berechnete hingegen einen Rückgang der Schneefalltage um $0.5 \text{ d}_s \text{ a}^{-1}$, was gut mit der Studie von Scherrer et al. (2004) übereinstimmt. Wie frühere Studien über klimatische Schneevariabilität zeigten (Mote, 2003), ist die Veränderung der Anzahl Schneefalltage durch Veränderungen der lokalen Lufttemperatur und des Niederschlags zu erklären. Der Verlauf der Schneefalltage über die Zeit der Untersuchungsperiode korreliert mit dem Verlauf der jährlichen Niederschlagssummen, aber nicht mit der Zeitreihe der Lufttemperatur. Aus diesem Grund lässt sich der von Stähli (2015) und Scherrer et al. (2004) unterschiedliche Trend bezüglich der Schneefalltage im südlichen Alptal mit der registrierten Zunahme der Niederschläge erklären.

Im Allgemeinen sind die originalen Niederschlagsmesswerte immer mit einem Messfehler behaftet, welcher bei Regen etwa 5-15 % und bei Schnee etwa 20-50 % ist. Andere Messfehler in Bezug auf die Niederschlagsmessung sind die Verstopfung des Auffangbehälters, Messungen am Hang, Benetzungsverluste, Verdunstungsverluste, Ein- und Ausspritzen, Verluste aufgrund der Deformation des Windfeldes und Schneedrift (Wohlrab et al., 1992).

5.1.3 Abflussdaten

Die aus den lückenhaften Zeitreihen berechneten Jahresabflusssummen der permanenten Stationen (Tab. 24) sind mit 1563 mm a^{-1} im Vogelbach, 2046 mm a^{-1} im Lümpenenbach und 1973 mm a^{-1} im Erlenbach ähnlich hoch wie die von Burch (1994) veröffentlichten Werte für den Zeitraum 1978 bis 1993 (VOG: 1630 mm a^{-1} ; LUM: 1990 mm a^{-1} ; ERL: 2190 mm a^{-1}). Aus den originalen Zeitserien ist erkennbar, dass der Erlenbach und Lümpenenbach sehr grosse Abflusssummen sowie Jahresminima und Jahresmaxima im Vergleich zum Frifang-, Gämsch- und Teufbach aufweisen. Die Gründe für diese Unterschiede sind unterschiedlicher Natur. Einerseits entstehen sie durch den Vergleich von unvollständigen und unterschiedlich langen Zeitreihen und andererseits durch klimatische und physiographische Unterschiede in den untersuchten Einzugsgebieten. Hierzu zählen die Niederschlagsverteilung, Lufttemperatur und Verdunstung sowie die Beeinflussung durch den Untergrund, Landoberfläche (Hegg, 2006), Topographie und eine Vielzahl weiterer Faktoren (USGS, 2015), auf welche zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen wird (Kap. 5.3). Ebenfalls einen Einfluss haben die grossen räumlichen Unterschiede bezüglich der Schneemenge trotz relativ geringem Höhenunterschied und wenig Windverfrachtung. Zum Zeitpunkt der maximalen jährlichen Schneeakkumulation liegt unten im Tal etwa ein Drittel weniger Schnee als oben auf den Hängen. Dies gilt sowohl für Waldstandorte als auch für unbewaldete Standorte, sowie für schneereiche, wie auch für schneearme Jahre (Stähli, 2015). Für die Analyse und Vergleiche der Einzugsgebiete standen für diese Arbeit keine Angaben bezüglich der Schneedecke und Schneemenge zu Verfügung. Ein Teil des Lümpenenbachgebiets ist im Winter ein Bestandteil einer Skipiste des Wintersportorts Brunni. Aus diesem Grund wurde davon ausgegangen, dass der im Lümpenengebiet aufgrund der Pistenpräparierung eine für dieses Gebiet höhere Schneemenge liegt.

Die Abflusssummen des Vogelbachgebiets haben während der Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984 mit Ausnahme der Sommerabflüsse zugenommen. Der einzige signifikante Trend ist im Frühling zu beobachten mit einer Zunahme von 6 mm a^{-1} . Die Trendlinien der jährlichen Abflussdaten des Vogelbachs zeigen eine Zunahme von 23 mm a^{-1} der durchschnittlichen Jahresabflüsse auf welche auch Stähli (2015) im Kurzbericht über hydrologische Langzeittrends hinweist. Ausserdem zeigt sich in den Daten des Vogelbachs eine Abnahme der Spitzenabflüsse sowie der Niedrigwasserzustände. Die Gründe hierfür liegen einerseits bei der Zunahme der Jahresniederschläge sowie der Abnahme Regenereignissen im Frühling und der damit verbundenen geringeren Anzahl an Regen-auf-Schnee Ereignissen im Frühjahr, welche für einen Teil der Spitzenabflüsse verantwortlich sind. Ein weiterer Grund ist die Abnahme der Starkniederschläge im Sommer. Die hohen Abflussraten im Frühling, genauer gesagt im Mai, kommen aufgrund der Schneeschmelze und den einsetzenden Niederschlägen (Regen-auf-Schnee Ereignisse) nach der winterlichen Trockenzeit zu Stande (Kap. 4.1.3). Im Gämschbachgebiet sind im Frühling die Abflüsse etwa gleich hoch wie im Sommer, was auf einen geringen Einfluss der Schneeschmelze auf die hohe Abflussraten in diesem Gebiet schliessen lässt. Im Winter sind die Abflussraten grundsätzlich sehr gering aufgrund des Schneedeckenaufbaus. Die frühere Ausaperung der Schneedecke und der damit verbundene abnehmende Abflusstrend im April oder Mai, wie sie Stähli (2015) beschreibt, sind in den Daten nicht ersichtlich. Die grössten Abflusstageswerte wurden jedoch aufgrund von Starkniederschlägen und Gewitter im Hochsommer gemessen. Hohe Abflüsse entstehen vorwiegend durch kurzzeitige Starkniederschläge oder Schauer. Hochwasser entstehen demnach meist durch langanhaltende Niederschläge (Dauerniederschläge). Ausserdem hat die Schneeschmelze einen erheblichen Einfluss auf die Abflussganglinie. Extreme Hochwasser werden durch sie allein aller-

dings kaum ausgelöst. In Verbindung mit Niederschlägen in flüssiger Form (Regen-auf-Schnee-Ereignisse) sind sie jedoch häufig Ursache für extreme Hochwasser. Im Herbst und im Winter herrschen neben einzelnen Regenereignissen und der folgenden Abflussreaktion Niedrigwasserzustände. In den Einzugsgebieten des südlichen Alptals sind Abflussanstiege auch nach kleineren Niederschlagsereignissen erkennbar (Kap. 4.1.3).

Wie bei der Messung der Luft- und Niederschlagsdaten können bei der Messung der Abflussdaten gewisse Unsicherheiten und Fehler auftreten. Die Durchführung von Abflussmessungen bei Hochwasserabflüssen ist beispielsweise in Wildbächen wegen der auftretenden hohen Geschwindigkeiten und der mitgeführten Feststoffe (Holz, Geschiebe, Schwebstoffe) oftmals schwierig (ETH, 2014). Wurden Abflussmessstationen an zu tief gelegenen Standorten oder zu nahe am Fließgewässer errichtet, kann es bei grossen Hochwassern zum Ausfall der Geräte und Registriereinrichtungen sowie Überschreiten der Messbereiche kommen (Hodel und Petrascheck, 2008). Aus diesem Grund muss eine Pegelmessstation einige Anforderungen erfüllen, damit der gesamte Abfluss erfasst werden kann und nützliche Daten geliefert werden: es darf kein veränderlicher Rückstau auftreten, keine Verkräutung am Bachufer, das Profil sollte unveränderlich und der Untergrund sollte undurchlässig sein (ETH, 2014). Von den zerstörten Messstationen im südlichen Alptal sind nur sehr begrenzt Informationen über deren Messeinrichtungen verfügbar, darum ist es durchaus möglich dass die Bedingungen nicht erfüllt waren und es dadurch zu Messfehler gekommen. Viele der Einzugsgebiete, wie beispielsweise der Vogel- und Gämschbach, welche eine ausgeprägte Stufen-Becken Morphologie aufweisen werden diesen Anforderungen vermutlich nicht gerecht. Ausserdem führen die häufig auftretenden hohe Abflüsse und die steilen Gerinne im südlichen Alptal oftmals einem hohen Geschiebetransport und Profilveränderungen des Bachs, welche sich negativ auf die Messgenauigkeit auswirken. Bei nahezu allen Pegeln wird der Abfluss nur von Zeit zu Zeit gemessen um daraus eine Wasserstand-Abfluss-Beziehung herzuleiten, die sogenannte Abflusskurve. Jedoch sind die Abflussmessungen vor allem für die Extrembereiche wie Hoch- und Niedrigwasser zu wenig vorhanden und meist ungenau (Vogelbacher, 2007). Eine mögliche Fehlerquelle bei Hochwasser ist das Erreichen des Schwimmers der Wasserstands-Messeinrichtung an der oberen Grenze und damit verbunden wird der korrekte Wasserstand unterschätzt. Dennoch kann der Wasserstand nicht immer ohne weiteres vom vorhergesagten Abfluss abgeleitet werden, da er von Eis, Treibgut, Eintiefung beziehungsweise Auflandung und anderen Umständen (Brückeneinsturz, Dammbbruch) beeinflusst werden kann. Während des Hochwassers kann es zudem zu Veränderungen der Gewässersohle im Pegelbereich kommen. Durch diese Veränderungen des Fließquerschnitts kann die bisherige Wasserstands- Abflussbeziehung nicht mehr verwendet werden, beziehungsweise sie liefert falsche Abflusswerte (Vogelbacher, 2007). Bei extrem hohen Abflüssen besteht auch die Möglichkeit, dass ein Teil des Wassers neben der Messstation durchläuft beziehungsweise sich ein anderer Weg ins Tal bannt.

Die durchschnittlichen Jahresabflusssummen der sieben untersuchten Einzugsgebiete haben riesige Unterschiede. Bewegen sich die Summe für den Lümpenen- und Erlenbach bei ungefähr 2000 mm a^{-1} , so hat der Gämsch- und Frifangbach eine durchschnittliche Abflusssumme von etwa 1100 mm a^{-1} . Für den Vogel-, Etteren und Teufbach wurden Summen von ungefähr 1500 mm a^{-1} gemessen. Da sich die Niederschläge im südlichen Alptal ungefähr homogen verteilen, sind diese Unterschiede auf andere Einflussfaktoren zurückzuführen. Einerseits spielen sicherlich die zuvor genannten Messfehler eine Rolle, welcher für die Gebiete mit einem hohen Gefälle wie dasjenige des Gämschbachs gross sein können. Andererseits spielen Verdunstungsraten und der Einfluss der Landnutzung und des Untergrunds eine wichtige Rolle auf welche im Kapitel 5.3.3 weiter eingegangen wird.

5.2 Inter- und extrapolierte Zeitreihen

5.2.1 Temperaturdaten

Die Vervollständigung der lückenhaften Datensätze anhand der multiplen linearen Regression ist eine gute Variante, wenn für die Komplettierung der unvollständigen Zeitperioden mehr als eine Zeitreihe zu Verfügung steht. Positiv ist ausserdem sicherlich die Belassung der originalen Daten, obwohl Messfehler so stärker in die Analysen mit einfließen. Die Annahme, dass die Lufttemperaturen bei den Abflussmessstationen gemessen wurden, birgt allerdings gewisse Unsicherheiten, da die Temperatur in erster Linie von der Höhe abhängt und für die Einzugsgebiete keine Höhenabhängigkeit erkennbar war. Ausserdem sind die Gebietstemperaturen allesamt zu hoch geschätzt, da die Lufttemperatur nicht auf der durchschnittlichen Höhe des jeweiligen Einzugsgebiets gemessen wurde, sondern bei der tiefer gelegenen Abflussmessstation. Da die Lufttemperaturdaten aber eigentlich nur als Hilfsparameter für die Modellierung der Abflussdatensätze dienen, ist diese Methode durchaus ausreichend.

Durch die Komplettierung der Lufttemperaturzeitreihen sind die Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten deutlich abgeschwächt, aufgrund der Nutzung der multiplen linearen Regression zur Schätzung der fehlenden Daten. Die sieben verschiedenen, kompletten Temperaturzeitreihen zeigen einen ähnlichen Verlauf über die Dauer der Untersuchungsperiode von 1968 bis 1984, was aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Gebiete nicht überrascht (Kap. 4.1.1). In den ersten Jahren des Untersuchungszeitraums zeigt sich zwischen den meisten Einzugsgebieten einen Versatz der Kurven um $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, wobei die Ursache auf die Inter- und Extrapolationsmethode zurückzuführen ist. Bis zum 31.12.1971 standen für die Extrapolation der Lufttemperaturdaten anhand der linearen Regression nur die Daten des Vogelbachs zur Verfügung. Die extrapolierten Datensätze sowie die Kurven haben somit ähnliche Werte wie die Zeitreihe des Vogelbachgebiets. Die geringsten Abweichung sind zwischen den Lufttemperaturzeitreihen des Vogelbach- und des Gämschbachsgebiets ersichtlich. Obwohl die Einzugsgebiete des Gämschbachs und des Vogelbachs bezüglich der räumlichen Distanz nahe beieinander liegen und somit die Temperaturzeitreihen stark korrelieren, ist das benutzt Regressionsverfahren für die Komplettierung der Gämschbachdaten unvorteilhaft, da die gesamte Zeitreihe aus den Daten des Vogelbachgebiets geschätzt wurden. Eine bessere Lösung für die Vervollständigung der Datensätze wäre die Verwendung einer Höhenabhängigkeit oder einer Beziehung über die Distanz. Bei den verwendeten Datensätzen konnte diese Art von Vervollständigung jedoch nicht angewendet werden, worauf die multiple lineare Regression als Schätzverfahren verwendet wurde.

Die Einzugsgebiete mit den höchsten beziehungsweise geringsten Lufttemperaturen bleiben auch nach der Komplettierung der Zeitreihen das Lämpenenbachgebiet mit einem durchschnittlichen Jahresmittelwert von $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und das Gämschbachgebiet mit einem Mittelwert von $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kap. 4.1.1.). Der Unterschied beträgt demnach über $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer Entfernung von 3.5 km und einem Höhenunterschied zwischen den Messstationen von 18 m. Auffallend sind die höheren Lufttemperaturen in den südlicheren Gebieten und am südöstlichen Hang des Tales. Die Gründe für die Unterschiede zwischen den Gebieten sind unterschiedlicher Natur. Einerseits hat die Topographie und Exposition einen Einfluss auf die Dauer und die Intensität der Sonneneinstrahlung. Andererseits wird die warme Luft (teilweise Föhn) am südlichen Ende des Tals (Alptalkessel) gespeichert, da sie aufgrund der Berge nur schlecht entweichen kann. Ausserdem hat die Oberflächenbeschaffenheit einen Einfluss auf den Strahlungshaushalt; der Nadelwald weist beispielsweise eine tiefere Albedo als die Alpweide auf. Des Weiteren steuert die Landoberfläche auch die Luftfeuchtigkeit aufgrund der Verdunstung, welche in Waldgebieten deutlich höher ist als in Weidegebieten. Ein weiterer Einflussfaktor sind die bereits besprochenen

Messfehler. Zudem könnte die Annahme falsch sein, dass alle Lufttemperaturen bei den Abflussmessstationen gemessen wurden und somit auf ungefähr demselben Messniveau liegen, was die Datengrundlage verändern würde.

Die durchschnittlichen Jahresmittelwerte zeigen einen nicht signifikanten Trend von $+0.25\text{ °C}$ zwischen 1968 und 1984 (Kap. 4.1.1). Für das Alptal gibt Stähli (2015) einen Temperaturanstieg von $+1.67\text{ °C}$ an (gemessen an der MeteoSchweiz Station in Einsiedeln (1969-2012)). Berechnet man ausgehend von diesen Werten die durchschnittliche Temperaturzunahme pro Jahr so ist der gemessene Temperaturanstieg in Einsiedeln mehr als 2-mal höher als im südlichen Alptal. Jedoch haben die Temperaturen in jüngster Zeit mehr zugenommen als in den 70er Jahren (Perroud und Bader, 2013). Nach Burch (1994) hat die Temperatur im Vogelbachgebiet von 1968 bis 1993 aufgrund einer Zunahme der Sommertemperaturen um $+0.4\text{ °C}$ zugenommen, was mit den ermittelten Werten dieser Studie gut übereinstimmt. Die jahreszeitlichen Trends mit einer Abnahme der Winter- und Frühlingstemperaturen lassen sich aufgrund der Klimaszenarien der Schweiz nicht erklären, da vor allem die Wintertemperaturen in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben sollen (MeteoSchweiz, 2013a).

Anhand der mittleren monatlichen Lufttemperaturen und deren Unterschied zwischen originaler und komplettierter Zeitreihe ergibt sich ein Anhaltspunkt für die Güte des genutzten Regressionsmodells (Tab. 26). Die Unterschiede und Güte sind jedoch mit Bedacht zu interpretieren, denn die originalen Datensätze dürfen nicht als repräsentative Werte angesehen werden, da sie aus unvollständigen Zeitreihen bestehen. Die maximalen und minimalen Monatswerte weisen mit einer durchschnittlichen Differenz von 1.1 °C beziehungsweise 1.0 °C grössere Unsicherheiten auf als die mittleren Monatswerte mit Differenzen von 0.0 bis 0.6 °C . Die geringsten Abweichungen sind im Winter und die grössten Abweichungen im Frühling zu beobachten. Für die durchschnittlichen Monatsmittelwerte sind die Differenzen im Schnitt 0.2 °C mit einem maximalen Fehler im Mai von 0.6 °C (9%). Je länger die Zeitreihen sind, desto grösser ist auch die Wahrscheinlichkeit für extreme Werte, was die grössere Amplitude des komplettierten Datensatzes erklärt. Aus diesem Grund ist die Qualität der mittleren Monatswerte deutlich besser als die maximalen und minimalen Werte.

Die durchschnittliche Anzahl kalten Tage in den sieben Einzugsgebieten (Kap. 4.1.1) liegt bei $98\text{ d}_m\text{ a}^{-1}$ zwischen 1968 und 1984. Während der 17-jährigen Untersuchungsperiode hat die Anzahl kalte Tage im südlichen Alptal im Durchschnitt um 9 d_m zugenommen. Die grösste signifikante Zunahme mit $1.1\text{ d}_m\text{ a}^{-1}$ ist im Gämschbachgebiet feststellbar. Im Lämpenenbachgebiet nehmen die kalten Tage leicht ab im Laufe der Zeit. In der Literatur findet man Werte von 80 Frosttagen fürs Mittelland und 120 Frosttagen für die Vorlappen (MeteoSchweiz, 2013a, 2013b). Die Gründe für diese eindeutigen Unterschiede liegen einerseits in der unterschiedlichen Definitionen von kalten Tagen beziehungsweise Frosttag. Der kalte Tag ist definiert als ein Tag mit einer durchschnittlichen Tagestemperatur $\leq 0\text{ °C}$ und der Frosttag als ein Tag an dem das Minimum unter 0 °C liegt (MeteoSchweiz, 2013a). Andererseits korrelieren die Resultate der kalten Tage mit denjenigen der Temperaturzeitreihen und ihren Trends, welche im oberen Abschnitt besprochen wurden.

5.2.2 Niederschlagsdaten

Ein positiver Aspekt der multiplen linearen Regressionsmethode zur Komplettierung der Niederschlagszeitreihen ist wiederum das Belassen der originalen Werte. Anhand der mittleren monatlichen Lufttemperaturen und dem Unterschied zwischen originaler und komplettierter Zeitreihe ergibt sich ein Anhaltspunkt für die Güte des genutzten Regressionsmodells. Die Unterschiede und Güte sind jedoch mit Bedacht zu interpretieren, denn die originalen Datensätze dürfen nicht als repräsentative Werte angesehen werden, da sie aus unvollständigen Zeitreihen bestehen. Die Nachteile sind, dass gewisse Messstationen viel häufiger für die Komplettierung genutzt werden, wie beispielsweise die Niederschlagsammler VOG A und VOG B, welche eine lange Zeitspanne abdecken. Andererseits ist es unvorteilhaft, wenn gewisse Lücken aufgrund nur einer Zeitreihen einer anderen Messstation geschätzt wird. Jedoch handelt es sich bei dieser Methode nicht mehr um eine multiple, sondern nur noch um eine lineare Regressionsmethode, welche versucht wurde zu vermeiden.

Da für die Modellierung der Abflussdaten und den Vergleich der Einzugsgebiete die Gebietsniederschläge relevant sind und zwischen den originalen und den komplettierten Zeitreihen keine grossen Unterschiede aufgetreten sind, beschränkt man sich bei der Interpretation der komplettierten Niederschlagsdaten nur auf das Nötigste. Der Unterschied der durchschnittlichen Niederschlagssummen zwischen den zwei Talseiten ist mit 24 mm a^{-1} bedeutend klein, wobei auf der westlichen Talseite mehr Niederschlag gefallen ist. Grösser sind die Unterschiede der Niederschlagssumme bezüglich der Lage und Höhe der Messstationen. Die Totalisatoren auf dem unteren Messniveau (B) sammelten durchschnittlich 53 mm a^{-1} und die südlicheren Gebiete (ab Dorf Alpthal) 82 mm a^{-1} mehr Niederschlag (Kap. 5.1.2). Die Gründe für diese Unterschiede ergeben sich durch die topographische Lage der Messstationen und deren Auswirkung auf die Strahlungsbilanz, Feuchtigkeitsangebot der Luft und aufgrund der Windverhältnisse, welche sich meist aus Nord- und Westwindströmungen zusammensetzt. Ausserdem führen häufige Staulagen am Alpenkamm zu hohen Niederschlagssummen und einem rauen Klima. Der positive nicht signifikante Trend der durchschnittlichen Jahresniederschläge (Kap. 4.1.2) zeigt einem Anstieg von 11 mm a^{-1} , welcher hauptsächlich aus der Zunahme der Herbst- und Winterniederschläge und einer Abnahme der Sommerniederschläge resultiert. Der Unterschied zur durchschnittlichen Zunahme der Niederschläge, welche aus den lückenhaften Zeitreihen ermittelt wurde, liegt bei 6 mm a^{-1} . Keine signifikanten Änderungen hatte auch die MeteoSchweiz (2013b) im Klimabericht Ur-schweiz 2013 veröffentlicht, mit Ausnahme der Zunahme der Niederschläge im Winter in Einsiedeln für die Periode von 1864 bis 2012.

Die Abnahme der komplettierten jährlichen Niederschlagssummen im Vergleich zu den originalen Zeitreihen an den Messstationen im Lümpenen- und Erlenbachgebiet erfolgt aufgrund längerer Messperioden. Bei drei der vier Messstation in diesen Gebieten wurden erst ab 1976 Niederschlagsdaten erhoben. Da die jährlichen Niederschlagssummen von 1976 bis 1984 im Mittel höher sind als von 1968 bis 1976 sind die durchschnittlichen originalen Jahresniederschlagssummen überschätzt worden. Der gegenteilige Fall tritt an den anderen Messstationen auf von welchen nur Daten aus der ersten Untersuchungsperiodenhälfte vorhanden sind.

Die durchschnittliche Differenz beziehungsweise Fehler zwischen der mittleren monatlichen Niederschlagsmessung der originalen und komplettierten Zeitreihe (Tab. 30) beträgt 10.4 mm Mt^{-1} (5.7 %) entspricht. Die komplettierten Werte sind mit Ausnahme der Monate April, Juni und Juli höher als die originalen Niederschlagszeitreihen. Geringere Differenzen sind ausserdem im Sommerhalbjahr und in den Monaten Februar und November ersichtlich. Die Unsicherheiten sind demnach im Winterhalbjahr

deutlich grösser als im Sommerhalbjahr. Die maximale Abweichung der zwei Zeitreihen ist im Januar mit 31.0 mm Mt⁻¹ (22.3 %). Die komplettierten Zeitreihen wurden in einem nächsten Schritt in Gebietsniederschläge umgewandelt und dann als Hilfsparameter für die Modellierung der Abflusszeitreihen verwendet. Aus diesem Grund scheint die Qualität der komplettierten Zeitreihen akzeptabel.

5.2.2.1 Gebietsniederschläge

Die mittleren Jahresniederschlagssummen, welche von 2313 mm a⁻¹ im Frifangbachgebiet und 2015 mm a⁻¹ im Etterenbachgebiet reichen (Tab. 32), zeigen für eine kleine Fläche wie diejenige des südlichen Alptals deutliche Unterschiede der Jahresmittelwerte über die Zeitperiode von 1968 bis 1984 auf. Das Gebiet des Etterenbachs weist die tiefsten Niederschlagssummen auf, bei welchen die Niederschlagssumme des Totalisators ETT A einen sehr grossen Anteil hat und welche unterschätzt wird wie die Double-Mass-Analyse zeigte. Eine sehr hohe Niederschlagssumme weist das Gebiet des Frifangbachs auf. Eine mögliche Ursache ist die Überschätzung der Messsummen des Messgeräts FRI B, welche mit 76 % einen riesigen Einfluss hat auf die Berechnung des Gebietsniederschlags. Ein weiterer Nachteil der Thiessen-Polygon-Methode ist die Ausserachtlassung der Topographie und ihren Einfluss auf den Niederschlag, da sich die Thiessen-Methode ausschliesslich auf die Distanzen zwischen den Messpunkten bezieht.

Tabelle 41: Vergleich der durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen der Gebiete Vogel-, Lümpepen- und Erlenbach zwischen den berechneten Gebietsniederschlägen und denjenigen aus der Literatur.

	1978-1993 (Burch, 1994)	1980-2011 (Stähli und Badoux, 2015)	1968-1984 (ber. Gebietsniederschlag)
VOG	2170 [mm a ⁻¹]	2200 [mm a ⁻¹]	2146 [mm a ⁻¹]
LUM	2290 [mm a ⁻¹]	2400 [mm a ⁻¹]	2195 [mm a ⁻¹]
ERL	2190 [mm a ⁻¹]	2300 [mm a ⁻¹]	2251 [mm a ⁻¹]

Die Gebietsniederschläge nach Burch (1994) und Stähli und Badoux (2015) entsprechen gut den geschätzten Werten dieser Arbeit. Die grösste Abweichung weist das Lümpepenengebiet mit einem Unterschied von 95 (4.3 %) beziehungsweise 205 mm a⁻¹ (9.3 %) auf. Unterschiede können unter anderem durch den Vergleich von unterschiedlichen Zeitperioden zu Stande kommen. Grundsätzlich ist die an einem Ort erreichbare Regenmenge vom regionalen Feuchteangebot der Atmosphäre abhängig, das auch als niederschlagsverfügbares Wasser bezeichnet wird (Lauer, 1995). Gründe für lokale Niederschlagsmengenunterschiede, abgesehen von der Methode zur Berechnung der Gebietsniederschläge, sind Bodenfeuchte, Lufttemperatur, Oberflächenbeschaffenheit, Wind, Albedo und Sonneneinstrahlung. Der berechnete Durchschnitt der Anzahl Regentage innerhalb der Zeitperiode von 1968 bis 1984 im südlichen Alptal beträgt 2940 Tage, was einem Prozentsatz von 47.3 % entspricht. Rund 60 % der Niederschläge entfallen auf das Sommerhalbjahr und 40 % auf das Winterhalbjahr, was mit den Werten von Keller (1970b) und Holliger (1984) übereinstimmt. Die Differenz zwischen der Anzahl Trockenbeziehungsweise Niederschlagstage variiert zwischen den Einzugsgebieten um maximal 33 Tage für eine Zeitspanne von 17 Jahren, somit ist der Unterschied vernachlässigbar. Alles in allem entsprechen die saisonalen und jährlichen Trends, die man in den hydro-meteorologischen Daten des Alptals feststellen kann, anderen Trendstudien für die Schweiz (Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht (MeteoSchweiz, 2013a), Klimabericht Urschweiz 2013 (MeteoSchweiz, 2013b)).

5.3 Modellierte Zeitreihen

5.3.1 Abflussdaten

Die modellierten Jahresabflusssummen der Einzugsgebiete entsprechen ungefähr den Werten von Burch (1994) und Stähli und Badoux (2015) (Tab. 42). Die Differenzen zwischen den jährlichen Abflusssummen entstammen einerseits aufgrund der Datenerhebung während unterschiedlichen Zeitperioden und den bereits verglichenen unterschiedlichen Niederschlagsdaten. Einen weiteren Einfluss können ausserdem die unterschiedlich grossen Verdunstungsraten, auf welche im Kapitel 5.3.3 eingegangen wird. Des Weiteren bestehen immer auch gewisse Unsicherheiten bei modellierten Werten, wie beispielsweise aufgrund der starken Vereinfachung der Realität mit Hilfe des Modells, fehlerhaften Inputdaten, Unsicherheiten bei der Wahl der Modellstruktur sowie der Festlegung der Grenzwerte der Parameter.

Tabelle 42: Vergleich der durchschnittlichen Jahresabflusssummen der Gebiete Vogel-, Lümpepen- und Erlenbach zwischen den modellierten Werte und denjenigen aus der Literatur.

	1978-1993 (Burch, 1994)	1980-2011 (Stähli und Badoux, 2015)	1968-1984 (mod. Abfluss)
VOG	1630 [mm a ⁻¹]	1600 [mm a ⁻¹]	1690 [mm a ⁻¹]
LUM	1990 [mm a ⁻¹]	2000 [mm a ⁻¹]	2030 [mm a ⁻¹]
ERL	1740 [mm a ⁻¹]	1800 [mm a ⁻¹]	1910 [mm a ⁻¹]

Die modellierten durchschnittlichen Jahresabflüsse weisen über die Periode von 1968 bis 1984 einen positiven, aber deutlich abgeschwächten nicht signifikanten Trend von 8 mm a⁻¹ auf (Kap. 4.1.3). Der Unterschied der simulierten und beobachteten jährlichen Abflusssummen über die gesamte Untersuchungsperiode wurde durch den Einbezug von Datensätzen der Bäche mit eher geringem Abfluss zu Beginn der Untersuchungsperiode verursacht. Aus diesem Grund lässt sich sagen, dass der Versatz aufgrund der lückenhaften Datensätze zu Stande kommt. Der positive Trend der Jahresabflüsse wird auch im Bericht zur Klimaänderung und die Schweiz 2050 (Schädler, 2007) beschrieben. In dieser Trendanalyse von gemessenen Abflüssen in kleinen und mittelgrossen Einzugsgebieten in der Schweiz (1930–2000) wurde in vielen der untersuchten Flüsse eine Zunahme der Jahresabflüsse festgestellt (Schädler, 2007). Aus dem Durchschnitt der untersuchten Abflussdaten ist ebenfalls eine nicht signifikante Zunahmetendenz der Abflüsse ersichtlich, wobei im Sommer eine Abnahme der Abflüsse und im Frühling, Herbst und Winter eine Zunahme der Abflüsse verzeichnet wurde (Kap. 4.1.3). Ein Grund für diese Trends ist die globale Klimaänderung und die damit verbundene Veränderung der Niederschlagsentwicklung, wie die Zunahme der Winter Niederschläge (Kap. 5.2.2). Im Vergleich zu den originalen Daten sind die modellierten jahreszeitlichen Trends im Frühling und Winter stark abgeschwächt. Im Herbst ist die Zunahme der Jahresabflüsse jedoch stärker geworden, sowie im Sommer die Abnahme. Die grössten Abflusszunahmen sind in den Gebieten Etteren- und Frifangbach ersichtlich. Der einzige Bach mit einem negativen Trend bezüglich der Jahresabflüssen ist der Teufbach, die Gründe werden im Kapitel 5.3.2 erläutert. Eine Abnahme der Abflüsse aufgrund der früheren Ausaperung im April, wie sie Stähli (2015) im südlichen Alptal feststellte, wird aus den Daten in dieser Arbeit nicht ersichtlich. Jedoch wird diese Abnahme im Zeitraum 1969 bis 2012 festgestellt (Stähli, 2015), während in dieser Arbeit der Zeitraum von 1968 bis 1984 untersucht wurde und keine Temperaturabnahme in dieser Zeitperiode ersichtlich war.

In allen Einzugsgebieten kommt im Frühling aufgrund der Ausaperung am meisten Abfluss zu Stande (Abb. 43). Die geringsten Abflüsse entstammen dem Winter und den Herbstmonaten aufgrund des Aufbaus einer Schneedecke und einer geringen Anzahl an Regenereignissen. Im Frühling besitzen die abflussreichsten Bäche wie der Frifang-, der Lämpenen- und Erlenbach ungefähr 3-4mal mehr Abfluss als im Winter. Der Grund für den starken Anstieg der Abflüsse im April und Mai ist die eintretende Schneeschmelze aufgrund erhöhter Lufttemperaturen im Frühjahr sowie das Einsetzen der Frühjahresregen und somit dem Eintreten von Regen-auf-Schnee Ereignissen. Im Sommer (Juni, Juli, August) sind ebenfalls hohe Abflusswerte zu erwarten, aufgrund sommerlicher Gewitter und Starkniederschlägen. Die geringste Differenz in der Abflussmenge zwischen Frühling und Sommer hat der Gämschbach. Daraus lässt sich schliessen, dass das Einzugsgebiet nur gering durch die Schneeschmelze beeinflusst wird. Grosse Unterschiede sind beim Lämpenen-, Frifang- und Erlenbach erkennbar, bei welchen die Schneeschmelze somit einen grossen Einfluss auf das Abflussverhalten hat. Mögliche Gründe für diese Beobachtung liegen in der Oberflächenbeschaffenheit der genannten Einzugsgebiete, welche einen geringen Waldanteil und einer geringe Einzugsgebietsneigung aufweisen, welche eine gute Auflagefläche für eine Schneedecke bietet.

Im Gämschbachgebiet ist die Schmelzperiode kurz und schwach ausgeprägt, was sich am Hydrographen in Kap. 4.1.3 zeigt. Der Frifangbach dagegen weist, wie bereits erwähnt, einen sehr starken Anstieg der Abflussrate beim Eintritt der Schmelzperiode auf. Die Gründe für diese Tatsache liegen im Aufbau der Schneedecke während den Wintermonaten, da im stark bewaldeten Gebiet des Gämschbachs aufgrund der Interzeption nur eine geringe Schneedecke gebildet wird. Im Kapitel 5.3.3 wird noch spezifischer auf die Wirkung des Waldes auf das Abflussverhalten eingegangen. Ausserdem ist die steile Topographie des Gämschbachs nicht geeignet für die Ansammlung einer hohen Schneedecke und auch Windverfrachtungen ins Einzugsgebiet des Gämschbachs sind aufgrund des dichten Waldes unwahrscheinlich. Der Einfluss der Schneeschmelze auf die Abflussreaktion im Frühling ist somit im Gämschbach sehr gering, jedoch gibt es tendenziell einen hohen Basisabfluss im Winter. Der hohe Basisabfluss entstammt dem exponierten Schnee auf den Kronendächern, der erhöhten Wärmestrahlung im Wald und der tieferen Albedo des Baumstammes. In Gebieten mit wenig Wald und einer geringen mittleren Neigung, wie im Lämpenen- und Frifangbach fällt der Einfluss der Schneeschmelze auf die Abflussreaktion im Frühling grösser aus. Der Wald im Erlenbach ist relativ offen, was bedeutet, dass sich eine Schneedecke im Winter gut aufbauen kann, diese aber im Frühling im Schatten der Bäume liegt und somit eher langsam abschmilzt. Das Etterenbachgebiet hat einen geringen Basisabfluss, die Gründe hierfür sind nicht bekannt. Jedoch spielen bei der Messung von Basisabfluss und ebenso bei Hochwasserabflüssen grosse Unsicherheiten bezüglich des Messsystems mit. Ausserdem haben der Etteren- sowie der Erlenbach einen hohen Nassflächenanteil, was den Bodenfrost erhöht und die Auswirkung der Bodenwärme auf die Schneeschmelze an der Übergangszone zwischen Boden und Schnee reduziert.

Der Gämschbach zeigt eine sehr geringe Abflussreaktion auf die Sommerniederschläge im Vergleich zu den anderen Bächen im südlichen Alptal (Abb. 18). Der Lämpenen-, Frifang- und Erlenbach zeigen hingegen schnelle und hohe Abflussreaktionen auf sommerliche Regenfälle. Gründe für dieses unterschiedliche Abflussverhalten ist der unterschiedliche prozentuale Anteil an Wald an der gesamten Einzugsgebietsfläche. Ein grosser Waldanteil kann aufgrund einer guten Durchwurzelung des Bodens die Abflussreaktion dämpfen. Ausserdem senken die Interzeptionsverluste des Kronendachs ebenfalls die Abflusssummen im Sommer. Zusätzlich spielt auch die lokale Niederschlagsverteilung im südlichen Alptal eine Rolle, da das Gämschbachgebiet deutlich geringere Niederschlagssummen verzeichnet als beispielsweise der Erlen- oder Frifangbach.

Im Vergleich zu den originalen Abflusssummen haben sich die modellierten Summen für den Erlenbach und den Lämpenenbach leicht gesenkt, bei allen anderen Gebieten führte die Modellierung zur Erhöhung der Abflusssummen, vor allem im Frifang- und dem Gämschbach sind diese mit Differenzen von 800 mm a^{-1} respektive 500 mm a^{-1} enorm gross. Die grösste Zunahme der jährlichen Abflusssummen weisen somit die Bäche mit den kürzesten originalen Zeitreihen und den geringsten Jahresabflusssummen der originalen Datensätze auf. Die modellierte Abflusssumme des Teufbachs mit einer Summe von 1327 mm a^{-1} ist gering im Vergleich zu den anderen sechs untersuchten Bächen. Neben klimatischen Gründen sind physiographische Faktoren, wie die Grösse, Form, Steigung und Exposition des Einzugsgebiets sowie die Landnutzung, Boden, Geologie, Topographie und Entwässerungsdichte für die unterschiedlich hohen Abflussraten der Bäche im südlichen Alptal verantwortlich. Zusätzlich spielen die grossen Unsicherheiten in Bezug auf die Jahreswerte eine Rolle, welche einerseits durch die Komplettierung und Modellierung der Zeitreihen und andererseits durch die Messung der Daten entstanden sind. Auf die Unsicherheiten und Einflussfaktoren der Jahressummen wird im Kapitel 5.3.3 eingegangen.

Die Korrelationen der Abflusszeitreihen widerspiegeln ansatzweise die topographische Lage sowie die Nachbarschaften der Einzugsgebiete beziehungsweise Bäche im südlichen Alptal (Tab. 36). Aus diesem Grund ist beispielsweise die Abflusszeitreihe des Vogelbachs am ähnlichsten zu derjenigen des Gämsch- und Etterenbachs. Am weitesten voneinander entfernt liegen die Gebiet Vogel- und Erlenbach, bei welcher die Korrelation zwischen den Abflusszeitreihen mit dem Wert von 0.755 auch am geringsten ist. Räumlich nah gelegene Einzugsgebiete weisen ähnliche Klima, Geologie und Boden Verhältnisse auf, was zu grossen Korrelationen zwischen den Abflusszeitreihen führen kann.

Der Vergleich zwischen den originalen und modellierten mittleren monatlichen Abflusssummen zeigt geringe Unterschiede zwischen diesen zwei Abflusszeitreihen (Tab. 37). Die modellierten Datensätze sind im Hochsommer etwas höher als die Werte der originalen Datensätze, aufgrund einer höheren Wahrscheinlichkeit auf extreme Niederschlagsereignisse. Die grössten Unterschiede zwischen den simulierten und beobachteten Datensätze existiert beim Frifang-, Gämsch- und Teufbach. Die modellierten Abflussdaten sind im Frifang- und Gämschbach in jedem Monat weit über dem originalen Wert. Gründe hierfür sind einerseits die geringe Anzahl an Abflussdaten sowie der zu hohen Eingabe des Niederschlagswertes. Ausserdem ist die Verdunstung für diese beiden Gebiet zu tief geschätzt worden. Wie bereits oben erwähnt könnte die zu tiefen Messungen der Abflusswerte ein weiterer Grund für Fehler sein.

5.3.2 Modellgüte der Abflusssimulationen

Anhand des schlechten Kalibrierungsergebnisses des Teufbachs mit Werten von 0.0 bis -0.5 je nach Gütemass war ersichtlich (Kap. 4.3.2), dass die Eingabedaten fehlerhaft waren oder zumindest etwas nicht stimmte. Aus diesem Grund erfolgte eine erneute Begutachtung der Eingabedatensätze. In Bezug auf grosse Abflussereignisse waren grosse Unterschiede in der Abflussmenge zwischen dem Teufbach und allen anderen Einzugsgebieten zu erkennen. Ein weiterer Grund, welcher die Korrektheit bezüglich der Abflusszeitreihe der Abflusszeitreihe in Frage stellte, war die sehr lange lückenfreie Zeitreihe des Teufbachs von 1969 bis 1984, während in der Literatur kaum Informationen zu diesem Einzugsgebiet zu finden waren. Keller (1990) und Burch (1994) schrieben zudem in ihren Abhandlungen, dass die Abflussmessstation des Teufbachs von 1971 bis 1973 in Betrieb gewesen war. Aus den genannten Gründen wurden die analogen Datenblätter des angeblichen Teufbachs erneut begutachtet. Anhand einer Randnotiz auf einem analogen Datenblatt und einer Tabelle der forstlichen Hydrologie der WSL wurde festgestellt, dass die Abflussdaten nicht zum Teufbach, sondern zu einem Kleingebiet mit der Einzugsgebietsnummer 11 gehörten. Nach Rücksprache mit Manfred Stähli vom WSL, war klar das die Abflussdaten, welche für die Analyse und Modellierung des Teufbachs verwendet wurden, aus einem Kleingebiet der Region Schwarzsee stammten. Aus diesem Grund waren die originalen und modellierten Abflussdaten sowie deren Analysen nicht zu gebrauchen. Nach vergeblicher Suche im hydrologischen Archiv der WSL nach den Abflussdaten des Teufbachs wurde eingesehen, dass diese Daten nicht auffindbar sind und darum eine Modellierung mit den originalen Daten nicht möglich war.

Das Kalibrierungsergebnis (Kap. 4.3.2) des Vogelbachs weist eine mittlere Differenz von -124 mm a^{-1} auf, was mit einem jährlichen Abflussvolumen von 1693 mm a^{-1} einem Fehler von 7.3 % entspricht. Deutlich grössere mittlere Differenzen (Fehler) mit -358 (17.9 %) und -472 mm a^{-1} (29.5 %) besitzen der Frifang- und Gämschbach. Daraus lässt sich schliessen, dass der simulierte Abfluss jeweils zu hoch geschätzt oder der beobachtete Abfluss zu tief gemessen wurde. Andere Ursachen für mittlere Differenz könnten zu hohe Niederschlagsmengen oder zu geringe Verdunstungsraten darstellen. Diese Ursachen und die Über- beziehungsweise Unterschätzung des Abflusses hat grosse Auswirkungen auf die Wasserbilanz des jeweiligen Einzugsgebietes (Kap. 5.3.3). Ausserdem ist im Kalibrierungsergebnis ersichtlich, dass das logarithmische Gütemass ($\log R_{\text{eff}}$) tiefere Werte als dasjenige des Lindström und des R_{eff} aufweist, das heisst die Hoch- und Mittelwasserabflüsse werden besser simuliert als die Niedrigwasserabflüsse. Besonders stark gilt dies für das Gämschbachgebiet, wo der Wert des $\log R_{\text{eff}}$ bei -0.01 liegt. Jedoch ist auch die Messung von Mittelabflüssen einfacher, da bei extremen Situation vermehrt Messfehler auftreten aus bereits genannten Gründe (Kap. 4.3.2). Aus diesem Grund wird angenommen, dass auch das HBV-Modell diese hydrologischen Ereignisse schlechter abschätzen kann.

5.3.3 Wasserbilanzen der Einzugsgebiete

Die Verdunstungswerte von Burch (1994) und Stähli und Badoux (2015), welche in der Tabelle 43 dargestellt sind, weisen deutlich höhere Verdunstungsraten auf als diejenigen, welche das HBV-Modell anhand der 12 monatlichen Verdunstungswerte schätzt. Aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz lassen sich ebenfalls Verdunstungswerte für das nördliche Alptal von 487-529 mm a⁻¹ und für das südliche Alptal Werte von 241-329 mm a⁻¹ herauslesen (HADES, 2015), welche für das Vogelbachgebiet deutlich höher liegen als die modellierten Werte. Die berechnete Verdunstungsrate anhand der Niederschlags- und modellierten Abflusssumme weisen in Bezug auf den Vogelbach deutlich höhere Werte auf, welche ausserdem mit der Literatur besser übereinstimmt und daher ein Beweis für die zu tief modellierte Verdunstungsrate ist.

Tabelle 43: Vergleich von Verdunstungswerten der Gebiete Vogel-, Lümpenen- und Erlenbach zwischen Burch (1994), Stähli und Badoux (2015), der berechneten sowie der modellierten Verdunstung.

	1978-1993 (Burch, 1994)	1980-2011 (Stähli und Badoux, 2015)	1968-1984 (ber. Verdunstung)	1968-1984 (mod. Verdunstung)
VOG	540 [mm a ⁻¹]	560 [mm a ⁻¹]	473 [mm a ⁻¹]	223 [mm a ⁻¹]
LUM	300 [mm a ⁻¹]	420 [mm a ⁻¹]	167 [mm a ⁻¹]	238 [mm a ⁻¹]
ERL	450 [mm a ⁻¹]	510 [mm a ⁻¹]	333 [mm a ⁻¹]	307 [mm a ⁻¹]

In der Schweiz erreicht die aktuelle Verdunstung im Jahresmittel rund 80 % der maximal möglichen Verdunstung und beträgt ungefähr 480 mm a⁻¹ (Menzel et al., 1999). Diese Werte sind demnach etwa doppelt so hoch wie die jährlichen Verdunstungssummen, welche durch das HBV-Modell geschätzt wurden. Die in der Verdunstungsdatei integrierten 12 Monatsmittelwerte sind entweder zu tief aufgrund der gemessenen Temperaturdaten oder aufgrund eines Berechnungsfehlers mit der Penman-Gleichung. Eine weitere Möglichkeit besteht in der differenzierteren Betrachtung der Verdunstung. Bei den Werten von Burch (1994) und Stähli und Badoux (2015) beinhaltet die Evaporation ebenfalls die Transpiration sowie die Interzeptions- und Sublimationsverluste, welche bei der Berechnung mit der Penman-Formel ausseracht gelassen wurde. Aus diesem Grund sind die aus der Wasserbilanzgleichung berechneten Verdunstungswerte eher mit denjenigen der Literatur vergleichbar, obwohl sie um 100 mm a⁻¹ zu gering sind. Jedoch wird ersichtlich, dass es zwischen den Gebieten merkliche Unterschiede in der Jahresverdunstung gibt, welche mit dem Flächenanteil des Waldes zunimmt. Für das Gämshbachgebiet mit einem Waldanteil von 83 % wird eine Jahresverdunstung von 506.9 mm a⁻¹ berechnet und für das Lümpenengebiet mit einem Anteil von 19 % eine Verdunstung von 166.8 mm a⁻¹. Die Gründe für diese Unterschiede sind die bereits angesprochenen Interzeptions- und Sublimationsverluste, welche bei Nadelwäldern 30-40 % des Gesamtniederschlags betragen (Brechtel, 1990). Eine Studie von Stähli und Gustafsson (2006) hat ergeben, dass man 50 % des Schneewasseräquivalents der Weiden in Waldgebieten findet, die restlichen 50 % sind Interzeptionsverluste.

Der Wald beeinflusst die Abflussbildung jedoch bei einem Niederschlagsereignis vor allem wegen der zusätzlichen Speicherung von Wasser im Boden. Grundsätzlich ähnlich, allerdings in viel kleinerem Ausmass, wirkt die Interzeption. Je mehr Wasser zurückgehalten wird, umso kleiner ist der Abfluss. Waldböden weisen in der Regel bei einem einsetzenden Niederschlagsereignis eine grössere Wasseraufnahmefähigkeit auf als Freilandböden, einerseits weil sie meist eine höhere Infiltrations- und Speicherkapazität besitzen, andererseits weil die Waldvegetation mehr Wasser verdunstet. Die tiefreichenden Wurzeln entziehen dabei den Böden rascher und bis in grössere Tiefen Wasser.

Die Wirkung des Waldes bei Hochwasserereignissen kann mit den untersuchten Daten nicht erklärt werden. Nach einem extremen Niederschlagsereignis wie beispielsweise im Sommer 1984 zeigen die Gebiete Erlen-, Vogel- und Etterenbach die grössten Abflussreaktionen. Hingegen weisen das Lümpe-
nenbach-, Frifangbach- und Gämschbachgebiet geringe Abflussreaktionen auf. Ein Grund für diese Begebenheit ist, dass der quantitative Waldeinfluss auf das Abflussvolumen vor allem auch im Zusammenhang mit dem Wasserspeichervermögen des unter dem Wald vorhandenen Bodens betrachtet werden muss. Je nach Untergrund, auf dem sich ein Boden entwickelt, übt der Wald eine mehr oder weniger starke Wirkung auf die Speicherkapazität aus. Flachgründige Böden auf undurchlässige Untergrund weisen generell kleine Speicherkapazitäten auf. Die flachgründigen Böden lassen somit den Unterschied zwischen Wald und Weide, gar nicht zur Geltung kommen. Bei einem Waldgebiet mit grösserem Wasserspeichervermögen kann die Wirkung des Waldes auf den Abfluss signifikant werden (Leuppi und Forster, 1990). Unter einem Waldgebiet kann sich die Speicherkapazität dieser Böden erhöhen, allerdings bleibt sie auch unter einem optimalen Bestand relativ gering (Hegg, 2006). Somit sind auf durchlässigen Böden bei Starkniederschlägen die Abflussspitzen in den stark bewaldeten Gebieten deutlich geringer als in den Gebieten mit einem geringen Waldanteil, wie Engler (1919) bereits im Rahmen des Sperbelgraben und Rappengraben entdeckte. Bei der Auswertung einer langjährigen Periode zeigt sich die hydrologische Waldwirkung in einer mit zunehmenden Bewaldungsgrad erhöhten Evapotranspiration und einem durch die Interzeptionswirkung von immergrünen Nadelwald gedämpften Abflussverhalten während der Schneeschmelze (Burch et al., 1996a). Diese Phänomene zeigen sich in einzelnen Einzugsgebieten im südlichen Alptal, wie beispielsweise im Gämschbachgebiet, welches fast kein schmelzbezogenes Abflussverhalten aufweist und mit 84 % einen sehr hohen Waldanteil besitzt. Der gegenteilige Fall tritt auch in den Gebieten Lümpe-
nen-, Frifang- und Erlenbach auf, welche einen Waldanteil von unter 40 % aufweisen und ein hohe Abflussrate während der Schmelzperiode aufzeigen. Während der Schneeschmelze ist aus Waldgebieten generell mit geringerem Abflussvolumen und auch mit einer Reduktion der Schmelzabflussspitzen zu rechnen. Die Abflussdynamik während der Schmelze wird aber auch massgeblich durch die Höhenverteilung des Waldes und die generelle Verteilung der Expositionen beeinflusst (Burch et al., 1996a). Eine mögliche Erklärung für die Abflussdynamik bei Starkniederschlagsereignissen ist der Anteil an Nassflächen, welcher bereits gesättigt ist und somit kein Niederschlag aufnehmen kann. Dadurch fliesst das Niederschlagswasser oberflächlich ab, was zu einer höheren Hochwasserwahrscheinlichkeit führt. Bei der Übertragbarkeit der Resultate ist jedoch Vorsicht geboten. Der Bewaldungsanteil an der Gesamtfläche allein lässt keinen direkten Schluss auf die hydrologischen Waldwirkungen zu. Nebst dem Waldanteil muss wie besagt auch der unter dem Wald vorhanden Boden und dessen Wasserspeichervermögen berücksichtigt werden. Dazu bedarf es einer differenzierteren Betrachtungsweise, sowie andere Gebietsparameter wie Drainagedichte, Wasserspeichervermögen, Infiltrationsvermögen, Topographie und Exposition (Burch et al., 1996a). Um repräsentative Aussage über den Einfluss der Bewaldung auf die Wasserbilanz machen zu können, müssen die zu vergleichenden Gebiete möglichst kleine Unterschiede in den restlichen Einflussfaktoren aufweisen (Burch, 1994), was im südlichen Alptal nur teilweise gegeben ist.

Der Frifang- und der Lümpe-
nenbach besitzen hohe Anteile des schnellen Abflusses, was man einerseits auch an der Parameterausprägung von PERC und KO sieht, da wenig Wasser in den Boden perkoliert und somit grösstenteils oberflächlich abfliesst. Die zwei Einzugsgebiete haben einen grossen Weideanteil und einen eher geringen Waldanteil, was für schlecht durchlässige Böden spricht und ein möglicher Grund für die Parameterausprägung darstellt. Der Gämschbach besitzt den grössten Anteil an langsam fließendem Abfluss. Gründe hierfür liegen in dem hohen Waldanteil und der damit verbundenen ho-

hen Perkulationsrate. Den grössten Abfluss mit einer mittleren Geschwindigkeit weist das Erlenbachgebiet auf, welches einen mittleren Waldanteil und saure Hangleyböden mit gehemmter Durchlässigkeit hat und somit eine mittlere Perkulationsrate aufweist. Beim Vergleichen der Gebiete können signifikante Unterschiede in den Komponenten der Wasserbilanz festgestellt werden. Als mögliche Ursachen kommen die folgenden Einflussfaktoren in Frage: Pedologischer Untergrund, Exposition, Gefällsverhältnisse, Strahlungsbilanz, Entwässerung, Drainagedichte, Bewirtschaftung, Vegetation und Bewaldung. Das Abflussverhalten des Vogelbachs unterscheidet sich beispielsweise vom Erlenbach aufgrund des höheren Waldanteils und den tiefgründigen und durchlässigen Böden. In den ausgeapernten Teil des Vogelbachs kann durch die Evapotranspiration der Niederschlag bereits in den Bodenspeicher infiltrieren. Die Schmelzrate im Vogel- und Erlenbachgebiet unterscheiden sich nur gering, trotz des unterschiedlichen Waldanteils. Dabei spielt die Waldstruktur eine bedeutende Rolle. Im Erlenbachgebiet ist der Waldanteil geringer, jedoch ist es ein lockerer Wald und schattet somit eine grössere Fläche ab, was im Frühling zu einer langsameren Schneeschmelze führt. Des Weiteren ist auch die Topographie und Exposition im Erlenbachgebiet zum Vogelbachgebiet verschieden was eine grössere Schneefreie Fläche zur Folge hat (Forster und Hegg, 1999). Dadurch ist es schwierig die Gebiete zu vergleichen, da sich mehrere Parameter unterscheiden und auch die Bodenverhältnisse nur für einzelne Gebiete bekannt sind und somit der Faktor, welcher das Abflussverhalten beeinflusst, nicht genau bestimmt werden kann.

Den Niederschlag berechnet das HBV-Modell intern für jede Höhenzone und mit dem Temperaturgefälle, während die Niederschlagssumme in der Wasserbilanz des HBV-Modells jedoch ohne Temperaturgefälle berechnet wird. Dadurch kann ein höher gelegenes Gebiet HBV intern mehr Niederschlag aufweisen als in der Wasserbilanz steht, was ein möglicher Grund dafür ist, dass die Wasserbilanz ungleich null ist.

5.3.4 Unterschiedliche Parameterausprägung bei der Modellierung der Abflussdaten

Die Parameterausprägung fällt in der Literatur sehr unterschiedlich aus, trotz der Verwendung ähnlicher Modelle. Während in der einen Studie FC und K2 nicht sensitiv sind und CFMAX und LP sensitiv sind (Uhlenbrook et al., 1999) können in einer anderen Studie PERC und LP nicht sensitiv und CFMAX, K1 und SFCF sensitiv sein (Seibert, 1997). Es konnte festgestellt werden, dass die Sensitivität der Parameter sehr stark vom untersuchten Einzugsgebiet abhängt. Jedoch sind in den meisten Studien die Parametersets der Schneeroutine, CFMAX, der Wellenablaufoutine und MAXBAS in den meisten Kalibrationsresultaten gut definiert und dadurch sensitiv. Die Parameter K0, K1, FC und Beta sind dagegen schlecht definiert und nicht sensitiv (Merz und Blöschl, 2004).

Im Gämsch- und Vogelbach ist die Perkulationsrate hoch, was ein vermehrter Wasserfluss vom oberen in den unteren Grundwasserkasten bedeutet. Diese Anzeichen lassen daraus schliessen, dass der hohe Anteil an Wald in diesen Gebieten und somit die Durchwurzelung des Boden zu einer erhöhten Infiltrationsrate führt und somit zu einem geringeren Oberflächenabfluss. Anhand der Ausprägung der Rezeptionskoeffizienten K0, K1 und K2 lässt sich das Abflussverhalten interpretieren. Die Abflüsse in den Gebieten des Lämpenen- und Frifangbachs bestehen hauptsächlich aus Spitzenabflüsse, also aus Oberflächenabfluss. Beide Gebiete weisen einen grossen Weideanteil auf und einen Waldanteil unter 40 %. Ausserdem entstammen diesen Gebieten die grössten Abflusssummen, aber auch sehr hohe Niederschlagssummen. Im Gämschbachgebiet kommen selten Spitzenabflüsse vor, aber dafür der höchste Basisabfluss mit ähnlichen Werten wie der Vogelbach. Der Erlenbach besitzt den grössten Abfluss des

oberen Grundwasserkastens bei geringem Wasserstand. Der Parameter C_{et} ist mit 0.5 mit Ausnahme des Erlenbachs auf dem Maximum, was darauf hindeutet, dass die Evaporation zu tief geschätzt wurde und somit nach oben korrigiert wurde. Der Lufttemperatur Schwellenwert ist im Gebiet des Lümpe-
nen- und Erlenbach beinahe 0°C . Dies deutet darauf hin, dass in diesen Gebieten deutlich mehr Schnee fällt als im Gämschbachgebiet mit einem Schwellenwert von -2.0°C . Vermutlich kann somit eine grössere Schneedecke aufgebaut werden und die Abflüsse im Frühling sind enorm hoch. Die Parameterausprägung der maximalen Bodenwasserspeicherung ist sehr unterschiedlich zwischen den Gebieten. Hohe Werte weisen die Gebiete Vogel-, Lümpe-
nen und Gämschbach auf. Sehr tiefe Werte wurden für das Gebiet des Erlenbachs ermittelt. Der SFCF Wert hat hohe Werte im Lümpe-
nenbachgebiet, was einer geringen Sublimation und somit einer geringeren Verdunstung entspricht. Mit der Erhöhung des Waldanteils in dem Gebiet nimmt auch dieser Wert ab. Der Parameter FC legt die Wassermenge fest, die maximal in der oberen Bodenzone, durch Interzeptions- und Muldenspeicher zurückgehalten werden kann. In Gebieten mit einem hohen Waldanteil oder einem durchlässigen Boden mit wenig Nass-
flächen hat dieser Parameter einen hohen Wert. Im Erlenbachgebiet gibt es einen sehr tiefen Wert, somit kommt ein Grossteil des Niederschlags oberflächlich zum Abfluss.

Höhere FC Werte führen ausserdem zu höheren aktuellen Verdunstungswerten sowie auch die tiefen LP Werte eine hohe aktuelle Evaporation hindeuten. Bei einer geringen Vegetationsdichte wie im Lümpe-
nenbachgebiet fällt somit auch der Parameter der aktuellen Verdunstung gering aus. Durch den Anpassungsparameter BETA können unterschiedliche Reaktionen verschiedener Bodentypen berücksichtigt werden. In der Literatur werden für BETA Werte zwischen 0.3 und 6 angegeben, wobei die meisten Anwendungen von Werten grösser 1 ausgehen (Uhlenbrook et al., 1999). Einen sehr kleinen Wert hat das Lümpe-
nenbachgebiet, dieser begründet auf dem geringen Waldanteil und dem eher undurchlässigen Boden und der dadurch geringen Wasserhaltekapazität. Das Vogel- sowie das Gämschbachgebiet weisen hohe Werte auf, was wiederum durch die bessere Bodenstruktur aufgrund der starken Durch-
wurzelung erklärten wird. Jedoch kann der maximale Wert von 8 im Erlenbachgebiet nur schwer erklärt werden. In der Literatur wird noch auf eine andere Erklärung der BETA Werte eingegangen. So ist der BETA Wert vielmehr ein Indikator für die Heterogenität innerhalb eines Einzugsgebiets als der Bo-
deneigenschaften. Ein hoher BETA Wert bedeutet somit eine grosse Heterogenität innerhalb eines Ein-
zugsgebiets, was zu einer zeitgleichen Überflutung im ganzen Einzugsgebiet kommt, sobald die Was-
serhaltekapazität erreicht ist. Die Heterogenität im Erlenbachgebiet aufgrund der diversen Landnut-
zungen ist jedoch nicht so ausgeprägt, dass damit der hohe BETA Wert erklärt wird.

6. Fazit und Ausblick

Während der untersuchten Periode von 1968 bis 1984 konnte im Alptal aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen eine Zunahme der Lufttemperatur, der Niederschlag- und der Abflussmenge gemessen werden. Die Temperaturentwicklung der originalen Daten zeigen eine jährliche Temperaturzunahme von $+0.071\text{ }^{\circ}\text{C}$, wobei die Winter- und Frühlingstemperaturen eine Abnahme und die Sommertemperaturen eine Zunahme verzeichnen, während die Herbsttemperaturen konstant bleiben. Nach der Komplettierung der Zeitreihe sind diese Temperaturunterschiede deutlich abgeschwächt und die jährliche Temperaturerhöhung beträgt $+0.014\text{ }^{\circ}\text{C}$. In beiden Fällen handelt es sich um eine nicht signifikante Temperaturzunahme. Durch die Komplettierung wurde zwar die Temperaturzunahme abgeschwächt, jedoch ist das Jahresmittel mit $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher als bei den originalen Daten mit $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zwischen den Einzugsgebieten weist die Lufttemperatur eine starke Korrelation zwischen den räumlichen Distanzen im Gebiet auf, nah gelegene Einzugsgebiete weisen die Werte somit eine höhere Ähnlichkeit auf. Im Süden und am südwestlichen Hang des Alptals sind höhere Temperaturen zu verzeichnen. Die originalen Niederschlagsdaten zeigen eine positive nicht signifikante Zunahme von 16.6 mm a^{-1} . Die Jahresniederschläge zeigen ein Nord-Süd Gefälle, wobei die nördlichen Gebiete geringere Niederschlagssummen verzeichnen als die südlichen Gebiete, in welchen die Tendenz zu Starkniederschlägen aufgrund der Kessellage steigt. Des Weiteren werden bei den tiefer gelegenen Messstationen mehr Niederschläge gemessen als bei den höher gelegenen, zudem verzeichnet die Westseite des Tals höhere Niederschlagswerte. Grundsätzlich fallen hohe Niederschlagssummen während den Sommermonaten aufgrund von Gewitter und geringe Summen im Winterhalbjahr. Der Trend ist durch die Komplettierung der Zeitreihen leicht abgeschwächt und die Zunahme der Niederschläge beträgt nur noch 10.7 mm a^{-1} , welcher hauptsächlich aus der Zunahme der Herbst- und Winterniederschläge und einer Abnahme der Sommerniederschläge resultiert. Die mittleren Niederschlagssummen reichen von 2313 mm a^{-1} im Frifanggebiet und 2015 mm a^{-1} im Etterenbachgebiet. Die Gründe für die Niederschlagsverteilung sind neben den bereits genannten topographischen Faktoren, die Bodenfeuchte, Lufttemperatur, Oberflächenbeschaffenheit, Windverhältnisse, Sonneneinstrahlung sowie die systematischen Messfehler und die Unsicherheiten bei der Berechnung der Gebietsniederschläge anhand der Thiesen-Polygon-Methode. Die multiple lineare Regression zur Komplettierung der Zeitreihen der Luft- und Niederschlagszeitreihen eignet sich gut, da die originalen Werte belassen werden und sich die Unterschiede zwischen den originalen und komplettierten Zeitreihen in Grenzen hält. Anhand der originalen Abflussdaten ist der grosse Unterschied zwischen den Abflusssummen des Erlen- und Lümpenbachs mit Werte von ungefähr 2000 mm a^{-1} mit denjenigen des Frifang- und Gämschbachs mit etwa 1100 mm a^{-1} . Ursachen für diese Unterschiede sind hauptsächlich klimatische und physiographische Faktoren sowie grosse Unsicherheiten bei der Erhebung der Messungen. Hohe Abflüsse im südlichen Alptal ereignen sich tendenziell im Frühling aufgrund der Schneeschmelze und im Hochsommer aufgrund Starkniederschlägen und Gewitter. Der durchschnittliche positive Niederschlagstrend im südlichen Alptal beträgt 33.0 mm a^{-1} . Der positive, aber nicht signifikante Trend der modellierten durchschnittlichen Jahresabflüsse liegt bei 7.7 mm a^{-1} und ist somit im Vergleich zu der originalen Abflussentwicklung von 1968 bis 1984 deutlich abgeschwächt. Die Abflüsse verzeichnen im Sommer einen Rückgang und in den restlichen drei Jahreszeiten eine Zunahme der Abflusssummen. Die Gründe liegen in der globalen Klimaänderung und der damit verbunden Änderung der Niederschlagsentwicklung.

Das Abflussverhalten der sieben untersuchten Einzugsgebiete fällt bei der Betrachtung der mittleren Jahresabflusssummen der mittleren Jahresabflusssummen sehr unterschiedlich aus. Die Gebiete mit einem prozentual hohen Anteil Wald an der Gesamtfläche weisen deutlich höhere Verdunstungssummen beziehungsweise Interzeptionsverluste auf. Ausserdem führt der Wald zur guten Durchwurzelung des Bodens und somit zu einer höheren Infiltrationsrate als in Gebieten mit einem hohen Nassflächenanteil oder einer grossen Landwirtschaftszone. Aus diesen Gründen kann die Wirkung des Waldes zu einem geringen und langsamen Abflussverhalten führen. Andere Faktoren, welche jedoch um einiges schwierig zu quantifizieren sind, sind der Einfluss des Bodens und der Geologie sowie die Neigung des Gerinnes und des Einzugsgebiets. Der Einfluss der Schneeschmelze auf die Abflusssummen in den schwyzerischen Voralpen ist gross. Einzugsgebiet, wie beispielsweise das Gämshbachgebiet, welche keine grosse Ausaperung vorweisen zeigen deutlich geringere Abflusssummen. Aufgrund der wenigen Informationen über die Bodenverhältnisse und die unterschiedliche Geologie der sieben untersuchten Einzugsgebiete konnte bezüglich diesem Thema keine Ergebnisse erbracht werden.

Die Unterschiede der Parameterausprägungen des HBV-Modells widerspiegeln die klimatischen und physiographischen Eigenschaften der einzelnen Einzugsgebiete zumindest teilweise. Die hohen PERC Werte im Gämshbach- und Vogelbachgebiet lassen auf gut durchlässige Böden schliessen, welche aufgrund der Durchwurzelung auch gegeben ist. Aufgrund der erhöhten Perkulationsraten kommen nur selten schnelle oberflächige Abflussverhalten vor, welche in Gebieten wie dem Lümpe- und Frifangbach hingegen durch eine hohe Anzahl an Spitzenabflüssen gegeben ist. Der SFCF Wert, welcher die Sublimation steuert zeigt tiefe Werte in Einzugsgebieten mit hohen Verdunstungsraten, wie dasjenige des Vogel- und Gämshbachs und sehr hohe Wert für das Lümpegebiet mit einem sehr geringen Waldanteil. Die Bodenspeicherkapazität FC ist sehr gering bei Nassflächen, welche bereits gesättigt sind und somit kein Wasser mehr aufnehmen können. Aus diesem Grund weist das Etteren- und Erlenbachgebiet sehr geringe FC Werte im Vergleich zu den anderen Einzugsgebieten im südlichen Alptal auf.

Die Regionalisierung der Gesetzmässigkeiten des hydrologischen Systems im südlichen Alptal ist möglich sofern die Einflussfaktoren wie Landnutzung, Geologie, Klima, Topographie in den zu Vergleichenden Gebieten ähnlich sind. Bedenkt man jedoch, dass die WSL den Standort im südlichen Alptal gewählt hat aufgrund des konstanten Klimas und der ähnlichen Geologie und dennoch gibt es grosse Unterschiede in den modellierten Daten der sieben Einzugsgebiete für den Zeitraum von 1968 bis 1984 ersichtlich. Somit ist bei der Übertragbarkeit der Resultate Vorsicht geboten. Der Bewaldungsanteil an der Gesamtfläche allein lässt keinen direkten Schluss auf die hydrologischen Waldwirkungen zu. Nebst dem Waldanteil muss auch der unter dem Wald vorhanden Boden und dessen Wasserspeichervermögen berücksichtigt werden. Bei flachgründigen Böden kann zwischen Wald und Weide kein Unterschied der Abflussreaktion ersichtlich sein. Dazu bedarf es einer differenzierteren Betrachtungsweise, sowie andere Gebietsparameter wie Drainagedichte, Wasserspeichervermögen, Infiltrationsvermögen, Topographie und Exposition. Um repräsentative Aussage über den Einfluss der Bewaldung auf die Wasserbilanz machen zu können, müssen die zu vergleichenden Gebiete möglichst kleine Unterschiede in den restlichen Einflussfaktoren aufweisen, was im südlichen Alptal nur teilweise gegeben ist.

7. Literatur

- Adeloye, A. J., Montaseri, M., 2002. Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study. *Hydrological Sciences Journal* 47, 679-692.
- Alexandersson, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climate* 6, 661-675.
- Allen, R.G., 1986. A Penman for all Seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112, 348-369.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy.
- Astel, A., Mazerski, J., Polkowska, Ż., Namieśnik, J., 2004. Application of PCA and time series analysis in studies of precipitation in Tricity (Poland). *Advances in Environmental Research*. 8, 337-349.
- BAFU, 2015. Hydrologie Daten. <http://www.hydrodaten.admin.ch/>. (aufgerufen 20.09.2015).
- Bänziger, R., Burch, H., 1990. Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bed load transport in a mountain torrent. In: *Hydrology in Mountainous Regions. I—Hydrological Measurements; The Water Cycle*, Lang, H., Musy, A. (eds), International Association of Hydrological Sciences Publication 193. IAHS Press, Wallingford, 207-214.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI, Report No. RHO 7, Norrköping, 1-134.
- Beven, K.J., 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105, 157-172.
- Beven, K.J., 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology* 320, 18-36.
- Beven, K.J., 2011. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
- Beyazgül, M., Kayam, Y., Engelsmann, F., 2000. Estimation Methods of Crop Water Requirements in the Gediz Basin of Western Turkey. *Journal of Hydrology* 229, 19-26.
- Birsan, M.V., Molnár, P., Burlando, P., Pfändler, M., 2005. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology* 314, 312-329.
- Blackie, J.R., Eeles, C.W.O., 1985. Lumped catchment models in Anderson M G and Burt T P eds *Hydrological forecasting* Wiley & Sons, New York 311-46.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological processes* 9, 251-290.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., 2013. *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press.

Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann, P. Rasch, S.K. Satheesh, S. Sherwood, B. Stevens and X.Y. Zhang, 2013: Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Brunni-Alpthal, 2015. Winterwonderland bei Zürich. <http://www.brunnialpthal.ch/Skigebiet.aspx> (abgerufen am 15.09.2015).

Burch, H., 1994. Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich 175, 18-33.

Burch, H., Forster, F., Schleppi, P., 1996b. Zum Einfluss des Waldes auf die Hydrologie der flysch-Einzugsgebiete des Alptals. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 12, 925-938.

Burch, H., Forster, F., Schleppi, P., Stadler, D., 1996a. Einfluss des Waldes auf Hochwasser aus kleinen voralpinen Einzugsgebieten: Influence of forests on floods from small prealpine catchments. Internationales Symposium Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Band 1, 159-169.

Burch, H., Fritschi, B., 1994. Die automatische Hochwassermessanlage im Alptal. Nouvelles der Landeshydrologie und -geologie 94, 11-13.

Buttelmann, M., Lohmann, B., 2004. Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion (Optimization with Genetic Algorithms and an Application for Model Reduction). *at-Automatisierungstechnik/Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik* 52, 151-163.

Davies, J.S., Keller, H.M., 1983. Dissolved loads in streams and rivers—discharge and seasonally related variations. In: Dissolved Loads of Rivers and Surface Water Quantity/Quality Relationships, Webb, B.W. (ed.). International Association of Hydrological Sciences Publication 141, IAHS Press, Wallingford, 79-89.

ETH, 2014. Praktikum Beobachtungsnetze. Hydrologie. Zusatzskript. http://www.iac.ethz.ch/edu/courses/bachelor/vorbereitung/observation_networks/E_Hydrologie_Zusatzskript.pdf (abgerufen am 15.09.2015)

Fanta, B., Zaake, B.T., Kachroo, R.K., 2001. A study of variability of annual river flow of the southern African region. *Hydrological Sciences Journal* 46, 513-524.

Fernando, D.A.K., Jayawardena, A.W., 1994. Generation and forecasting of monsoon rainfall data. In: 20th WEDC Conference on Affordable Water Supply and Sanitation, Colombo, Sri Lanka, 310-313.

Feyen, H., Leuenberger, J., Papritz, A., Gysi, M., Flüher, H., Schleppi, P., 1996. Runoff processes in catchments with a small scale topography. *Physics and Chemistry of the Earth* 21, 177-181.

Fischer, B.M.C., Rinderer, M., Schneider, P., Ewen, T., Seibert, J., 2015. Contributing sources to base-flow in pre-alpine headwaters using spatial snapshot sampling. *Hydrological Processes*, n/a-n/a.

Forster, F., Hegg, C., 2000a. Die Hochwasser vom Mai 1999: eine Analyse anhand von hydrologischen Messungen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 151, 183-191.

Forstliche Hydrologie, 1993. 25 Jahre Vogelbach/Alptal 1968-1993, Resultate aus hydrologischen Untersuchungen der WSL im Alptal/SZ, Unterlagen der Tagung vom 2. Juli 1993 in Alpthal. 1-22 .

Franchini, M., Wendling, J., Obled, C., Todini, E., 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *Journal of Hydrology* 175, 293-338.

Frei, R., 1963. Die Flyschbildungen in der Unterlage von Iberger Klippen und Mythen. Diplomarbeit, ETH Zürich, Nr. 3260, 0000, Leupold, W. (Ref.), Trümpy, R. (Korref.).

Gassmann, F., Graber, W., Klöti P., 1991. Ausblick—Erfahrungen und Schlussfolgerungen aus dem Nationalen Forschungsprogramm 14C. In: *Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen. Ergebnisse aus dem Nationalen Forschungsprogramm 14: Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz* 4, Schüpbach, E. (ed.), Verlag der Fachvereine, Zürich, 277-284.

Gehrig, R., Graber, W., Jeannet, P., Klöti, P., Portmann, W., Turner, H., Wasserfallen, P., 1991. Atmosphärische Untersuchungen—Fragestellungen und Methoden. In *Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen. Ergebnisse aus dem Nationalen Forschungsprogramm 14: Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz* 4, Schüpbach, E. (ed.), Verlag der Fachvereine, Zürich, 5-23.

Götz, Y., Fischer, B., 2013. Qualitätskontrolle und erste Analyse von alten, räumlich verteilten und digitalisierten Abflussdaten des Alptals: Erste Analyse von Abflussdaten der Einzugsgebiete des vogelbaches, Lümpenenbaches, Frifangbaches, Gämschbaches, etternbaches, erlenbaches und des Teufbaches.

Hades, 2015. Willkommen bei den Grundlagen- und Geodaten des HADES. <http://www.hadesdaten.unibe.ch/> (aufgerufen am 18.09.2015).

Haggett, Peter; Cliff, Andrew D.; Frey, Allan, 1977. *Locational Analysis in Human Geography*. New York: Wiley.

Hantke, R., 1967. *Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete 1: 50'000*. Kommissionsverlag Lehmann, Zürich, 91-122.

Hegg, C, Rickenmann, D., 2002. Geschiebetransport in Wildbächen – Erfahrungen aus 15 Jahren zeitlich hochaufgelösten Messungen. *Internationales Symposium 2002, Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau*, 39-48.

Hegg, C., McArdell, B.W., Badoux, A., 2006. One hundred years of mountain hydrology in Switzerland by the WSL. *Hydrological Processes*, 20, 371-376.

Hegg, C., Rickenmann, D., 1998. Short-time relations between runoff and bed load transport in a steep mountain torrent, in *Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes*, Summer, W., Klaghofer, E., Zhang, W. (eds.), IAHS Publication, 249, 317-324.

Helsel, D. R.; Hirsch, R. M. *Statistical Methods in Water Resources*; Elsevier: New York, 1992.

Herzog, J., Müller-Westermeier, G., 1998. Aufbereitung langer meteorologischer Messreihen für klimatologische Zwecke. BMBF-Forschungsprojekt (07VKV01/1), Schwerpunkt "Klimavariabilität und Signalanalyse", 1-9.

Hinz, E., 2004. Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf das Abfluss- und Erosionsverhalten. Diplomarbeit, Universität Dresden.

Hirsch, R.M., Slack, J.R., 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* 20, 727-732.

Hirsch, R.M., Slack, J.R., Smith, R.A., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research* 18, 107-121.

Holland, J., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge, MA: MIT Press, 1-211.
Holliger, P., 1984. Vergleich von Benthosiozönosen kleiner Fließgewässer mit verschiedenartigen Einzugsgebieten. Felduntersuchungen an Seitenbächen der Alp. Diplomarbeit, EAWAG.

Jäckli, H., 1967. Hydrologische Karte der Schweiz 1: 500'000 in Atlas der Schweiz, Tafel 16. Eidgenössische Landestopographie, Bern.

Keller, H.M., 1970a. Factors affecting water quality of small mountain catchments. *Journal of hydrology* 9. 133-141.

Keller, H.M., 1970b. Der Einfluss der Wassermenge auf den Chemismus kleiner Bäche, beobachtet in kleinen Einzugsgebieten im Alptal SZ. Keller, Hans Martin. Diplomarbeit, ETH Zürich, Nr. 4562, 0000, Jaag, O. (Ref.), Richard, F., (Korref.).

Keller, H.M., 1988. European experiences in long-term forest hydrology research. In: *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*, Swank, W.T., Crossley, D.A. (eds). *Ecological Studies* 66. Springer-Verlag, New York, 407-414.

Keller, H.M., 1990. Monitoring water and nutrient budgets in small mountain basins: collecting data and/or understanding processes?. *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research*, 225-233.

Keller, H.M., Burch, H.J., Guecheva, M., 1989. The variability of water quality in a small mountainous region. *International Association of Hydrological Sciences* 182, 305-312.

Kendall, M.G., 1948. *Rank Correlation Methods*. New York, Hafner.

Kite, G., 1989. Use of time series analyses to detect climatic change. *Journal of Hydrology* 111, 259-279.

Kuczera, G., 1997. Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models. *Water Resources Research* 22, 177-185.

Kwiatkowski, D., Phillips, P.C.B., Schmidt, P., Shin, Y., 1992. Testing the null of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics* 54, 159-178.

Lana-Renault, N., Latron, J., Karssenberg, D., Serrano, P., Regüés, D., Bierkens, M.F.P., 2011. Differences in streamflow in relation to changes in land cover: a comparative study in two sub-Mediterranean mountain catchments. *Journal of Hydrology* 411, 366-378.

Lang, H., Braun, L., Rohrer, M., Steinegger, U., 1994: Was bringt uns die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten?. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* 35, 52-60.

Lange, R.L., 2006. Analyse der Niederschlagsituation im Einzugsgebiet der Ruhr und Generierung von langen Niederschlagszeitreihen unter besonderer Berücksichtigung der Persistenz als Datengrundlage für eine Langfristsimulation der Talsperrenbewirtschaftung. Diplomarbeit, Bergische Universität, Wuppertal.

Lindström, G., Bergström, S., 1992. Improving the HBV and PULSE-models by use of temperature anomalies, *Vannet i Norden*, 16-23.

Longobardi, A., Villani, P., 2010. Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area. *International Journal of Climatology* 30, 1538-1546.

Machiwal, D., Jha, M. K., 2008. Comparative Evaluation of Statistical Tests for Time Series Analysis: Application to Hydrological Time Series. *Hydrological Sciences Journal* 53, 353-366.

Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.

Menzel, L., Lang, H., Rohmann, M., 1999. Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.1, Bern.

Merriam, C.F., 1937. A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna valley. *Transactions American Geophysical Union* 2, 471-476.

MeteoSchweiz, 2013a. Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht, Fachbericht MeteoSchweiz, 243, 1-36.

MeteoSchweiz, 2013b. Klimabericht Urschweiz 2013, Fachbericht MeteoSchweiz, 246, 1-66.

Milzow, C., Molnar, P., McArdeil, B.W., Burlando, P., 2006. Spatial organization in the step-pool structure of a steep mountain stream (Vogelbach, Switzerland). *Water Resources Research* 42, 1-11.

Mirza, M.Q., Warrick, R.A., Ericksen, N.J., Kenny, G.J., 1998. Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna river basins. *Hydrological Sciences Journal* 43, 845-858.

Penman, H.L., 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London* 193, 120-145.

Pfützner, B., Kaden, S., Krone, A., Flacke, W., (1992). Flächendifferenzierte hydrologische Einzugsgebietsmodellierung bei Anwendungen eines Geographischen Informationssystems (GIS). *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 36, 48-56.

Pugacheva, G., Gusev, A., Martin, I., Schuch, N., Pankov, V., 2003. 22-year periodicity in rainfalls in littoral Brazil. *Geophysical Research Abstracts* 5, EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France.

Radziejewski, M., Bardossy, A., Kundzewicz, Z. W., 2000. Detection of change in river flow using phase randomization. *Hydrological Sciences Journal* 45, 547-558.

Rao, A.R. Hamed, K.H., Chen, H.L., 2003. Nonstationarities in hydrologic and environmental time series 45, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Rapp, J., 2001. Probleme bei der Analyse von Klimatrends auf der Basis von Stationszeitreihen. *Klimastatusberichte des DWD*, 174-179.

Richard, F., Germann, P., 1978. Berechnung der Evapotranspiration aus der Wasserbilanz des durchwurzelten Bodens. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 25, 77-84.

Rinderer, M., van Meerveld, H.J., Seibert, J., 2014. Topographic controls on shallow groundwater levels in a steep, prealpine catchment: When are the TWI assumptions valid?. Water resources research 50, 6067-6080.

Roth, D., Günther, R., 1992. Vergleich von Meß- und Schätzwerten der potentiellen Evapotranspiration. Kulturtechnik und Landentwicklung 33, 13-22.

Said, S.E., Dickey, D., 1984. Testing for unit roots in autoregressive moving-average models with unknown order. Biometrika, 71, 599-607.

Schädler, B., 2007. Wasserwirtschaft. In: OcCC (eds): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC/ProClim, Bern, 168 p, 2007.

Schädler, B., Weingartner, R., 2002. Komponenten des natürlichen Wasserhaushalts 1961-1990. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3, Bern. .

Schmid, F., Fraefel, M., Hegg, C., 2004. Unwetterschäden in der Schweiz 1972–2002: Verteilung, Ursachen, Entwicklung. Wasser Energie Luft 96, 21-28.

Scholz, H., 1995. Bau und Werden der Allgäuer Landschaft. Zwischen Lech und Bodensee. Eine süddeutsche Erd- und Landschaftsgeschichte. 2. überarb. Aufl., Stuttgart, 305 S.

Schöniger, M., Dietrich, J., 2015. 5.3 Verdunstungsprozesse. <http://www.hydroskript.de/html/index.html?page=/html/hykp0503.html> (abgerufen am 16.09.2015).

Searcy, J.K., Hardison, C.H., 1960. Double-Mass Curves. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1541-B. USGS, Washington, 1-66.

Seibert, J., 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. Hydrology and Earth System Sciences 4, 215-224.

Seibert, J., 2005. HBV light version 2: User's manual. Stockholm University, 1-16.

Shahin, M., Van Oorschot, H.J.L., De Lange, S.J., 1993. Statistical Analysis in Water Resources Engineering. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Shin, Y., Schmidt, P., 1992. The KPSS stationarity test as a unit root test. Economic Letters 38, 387-392.

Spreafico, M., Weingartner, R., 2005. Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern.

Stähli, M., Gustafsson, D., 2006. Long-term investigations of the snow cover in a subalpine semi-forested catchment. Hydrological Processes 20: this issue.

Stähli, M., Andres, N., Badoux, A., Zappa, M., Rickenmann, D., Rickli, C., Turowski, J., Rücker, A., 2015. Exkursionsführer Alptal. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 1-40.

- Todini, E., 1988. Rainfall-runoff modeling - past, present and future. *Journal of Hydrology* 100, 341-352.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., Rodhe, A., 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure, *Hydrology Science Journal*, 44, 779–797.
- Vischer, D., 1994. Die Forsthydrologie und Hans M. Keller: Wissenschaftliche und persönliche Würdigung. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* 36, 7-17.
- von Storch, H., 1995. Misuses of statistical analysis in climate research. In: *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*, Storch, H.V., Navarra, A. (Eds.), Springer-Verlag, New York, 11-26.
- Waldner, P., Schneebeli, P., Schultze-Zimmermann, U., Flühler, H., 2004. Effect of snow structure on water flow and solute transport. *Hydrological Processes* 18, 1271-1290.
- Walthert, L., Blaser, P., Lüscher, P., Luster, J., Zimmermann, S., 2003. Langfristige Waldökosystem Forschung LWF in der Schweiz. Kernprojekt Bodenmatrix. Ergebnisse der ersten Erhebung 1994–1999. Swiss Federal Institute of Technology, 1-340.
- Wang, W., Van Gelder, P.H., Vrijling, J.K., 2005. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in Western Europe in the 20th Century. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance, Rethymno, Greece.
- Wittenberg, H., 2011. *Praktische hydrologie*. Vieweg + Teubner Verlag.
- Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., Sokolley, V., 1992. *Landschaftswasserhaushalt*. Paul Parey, Hamburg, 1-352.
- XLSTAT, 2015. XLSTAT 2014. http://www.xlstat.com/uploads/files/manual/xlstat_hilfe.pdf. (abgerufen am 17.09.2015).
- Zenker, T., 2003. Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung. Lysimeteruntersuchungen zum Penman-Montheit-Ansatz im Berliner Raum. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Wilke, B.M. (Ref.).
- Zhang, X., Lindström, G., 1997. Development of an automatic calibration scheme for the HBV hydrological model. *Hydrological Processes* 11, 1671-1682.

8. Anhang

A. Entwicklung zum Forschungsstandort Alptal

Im frühen 19. Jahrhundert waren die Wälder Europas zu einem Grossteil in einem sehr schlechten Zustand aufgrund der grossen Nachfrage nach Brennstoffen während der Industrialisierung. In dieser Zeit der ausgedehnten Waldrodungen in den Schweizer Alpen ereigneten sich einige starke Hochwasser, wie in den Jahren 1834, 1839, 1860 und 1868. Nach dem Hochwasser im Jahr 1868 kamen Hydrologen und Forstleute zum Schluss, dass neben den intensiven Regenfällen und den hohen Temperaturen auch der übernutzte und geschädigte Wald in den Einzugsgebieten ein entscheidender Faktor für die starken Überschwemmungen darstellte (Landolt, 1869). Das Forstpolizeigesetz, welches die finanzielle Unterstützung der Aufforstung und die Pflege des Waldes beinhaltet, wurde daraufhin auf Bemühen des Schweizerischen Forstvereins beschlossen (Schmid, 2001). Nach dem in Kraft treten des Gesetzes 1876 durfte die Gesamtwaldfläche der Schweiz nicht weiter vermindert werden. Des Weiteren wurden Schutzvorrichtungen gegenüber Naturgefahren ausgebaut und erhöht (Wullschleger, 1985), die darauf begonnene sehr intensive und aufwendige Verbauungs- und Aufforstungstätigkeiten hat die Hochwassergefahr durch Wildbäche mancherorts stark zurück gehen lassen (Keller, 1970b). Um das wissenschaftliche Verständnis über den Einfluss des Waldes bei Hochwasser zu stärken, wurde im Jahr 1885 die Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen gegründet, welche später in Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) und dann in Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) umgetauft wurde (Vischer, 1994). Neben der Bereitstellung einer guten Grundlage für die allgemeine Forstwirtschaft, erhielt das Institut die Aufgabe, die Regierung bei wald-meteorologischen Fragen zu unterstützen. Daraus folgte die Gründung der Forsthydrologie, welcher als der Forschungsschwerpunkt jener Zeit galt (Wullschleger, 1985).

Als Geburtsstunde der hydrologischen Forschung der WSL gilt der 8. April 1903 (Hegg et al., 2006). Damals wurde mit kontinuierlichen Messungen von Abflüssen in zwei 0.5 km² grossen und sehr unterschiedlich bewaldeten Einzugsgebieten im Berner Emmental (Sperbelgraben und Rappengraben) begonnen. Die Hauptuntersuchung galt dem Einfluss des Waldes auf das Abflussverhalten in unterschiedlichen Einzugsgebieten (Burch et al., 1996a). Engler (1919) präsentierte seine ersten Resultate, wonach der Wald die Hochwassergefahr massgeblich dämpft und zwar sowohl bezüglich Abflussvolumen als auch in Bezug auf die Abflussspitze. Die Resultate dieser bedeutenden und eindrücklichen Untersuchungen prägten das forsthydrologische Denken über Jahrzehnte (Burch et al., 1996a). Nachdem weitere Untersuchungen zu diesem Thema im Val Melera (Burger, 1955) und im Kanton Freiburg (Flysgebiet) (Nägeli, 1959) gemacht wurden, entschied sich die damalige EAFV Ende der 50er Jahre unter der Leitung von Professor Kurth die forsthydrologischen Forschungsarbeiten weiter zu intensivieren (Hegg et al., 2006). Aus diesem Grund wurde Hans Martin Keller als junger, begeisterungsfähiger Forstingenieur für zwei Jahre in die USA geschickt, um mit dem Master-of-Science in Watershed-Management zurückzukommen. Er startete dann 1963 mit seiner forsthydrologischen Tätigkeit am EAFV und entschied sich relativ schnell für das Alptal als Zentrum seiner Wasserbilanzforschung (Burch, 1994). Im Jahr 1965 starteten dann die ersten forsthydrologischen Messungen im Untersuchungsgebiet des Alptals (Hegg et al., 2006).

B. Hinweise zur Komplettierung der Niederschlagszeitreihen

Messtation (abhängige Variable)	Zeitraum	Messtation (erklärende Variable)
LUM A	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.69 - 31.12.69	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.84 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B
LUM B	01.01.68 - 31.12.69	VOG A, VOG B
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ZWA B
	01.01.71 - 31.12.75	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.83 - 31.12.83	VOG A, VOG B, ZWA B, ERL A, ERL B
FRI B	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.69 - 31.12.69	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.75 - 31.12.75	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.76 - 31.12.77	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.78 - 31.12.78	VOG A, VOG B, LUM A, ETT A, ZWA B
	01.01.79 - 31.12.82	VOG A, VOG B, LUM A, ZWA B
BUZ B	01.01.83 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B
	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.69 - 31.12.69	VOG A, GAM A
	01.01.78 - 31.12.78	VOG A, VOG B, LUM A, LUM B, ETT A, ZWA B, ERL A, ERL B
	01.01.79 - 31.12.82	VOG A, VOG B, LUM A, LUM B, ZWA B, ERL A, ERL B
GAM A	01.01.83 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B, ERL A, ERL B
	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.76 - 31.12.77	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.78 - 31.12.78	VOG A, VOG B, LUM A, ETT A, ZWA B
	01.01.79 - 31.12.82	VOG A, VOG B, LUM A
GAM B	01.01.83 - 31.12.84	VOG A, VOG B, LUM A, ZWA B
	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.70 - 31.12.75	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.76 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B
ETT A	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.69 - 31.12.69	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, FRI B, BUZ B, GAM A, ZWA B
	01.01.79 - 31.12.82	VOG A, VOG B, LUM A, LUM B, ZWA B, ERL A, ERL B
	01.01.83 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B, ERL A, ERL B
ETT B	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.69 - 31.12.69	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, FRI B, BUZ B, GAM A, ZWA B
	01.01.78 - 31.12.78	VOG A, VOG B, LUM A, LUM B, ETT A, ZWA B, ERL A, ERL B
	01.01.79 - 31.12.82	VOG A, VOG B, LUM A, LUM B, ZWA B, ERL A, ERL B
	01.01.83 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B, ERL A, ERL B
ZWA A	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
	01.01.69 - 31.12.69	VOG A, VOG B, GAM A
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, FRI B, BUZ B, ZWA B
	01.01.71 - 31.12.71	VOG A, VOG B, LUM A, FRI B, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.76 - 31.12.77	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.78 - 31.12.78	VOG A, VOG B, LUM A, ETT A, ZWA B
	01.01.79 - 31.12.82	VOG A, VOG B, LUM A, ZWA B
	01.01.83 - 31.12.84	VOG A, VOG B, ZWA B
	01.01.68 - 31.12.68	VOG A, VOG B
ZWA B	01.01.69 - 01.07.69	VOG A, VOG B, GAM A, GAM B
	01.01.68 - 31.12.69	VOG A, VOG B
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ZWA B
ERL A	01.01.71 - 31.12.75	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.68 - 31.12.69	VOG A, VOG B
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ZWA B
ERL B	01.01.71 - 31.12.75	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ETT A, ETT B, ZWA B
	01.01.68 - 31.12.69	VOG A, VOG B
	01.01.70 - 31.12.70	VOG A, VOG B, LUM A, BUZ B, ZWA B

C. Historische Entwicklung und Modellstruktur des HBV-Modells

Der erste erfolgreiche Lauf einer Version des HBV-Modells fand im Frühjahr 1972 am Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) statt. Konzeption und Weiterentwicklung wurden massgeblich von Sten Bergström (1976) geleistet bzw. geleitet. Von einem Wasserbilanzmodell entwickelte es sich in den darauf folgenden Jahren zu einem Modell für Hochwasservorhersagen, Simulation von Grundwasserständen, sowie Auswirkungen von Umweltänderungen auf Abflusseigenschaften. Modellanwendungen sind für ganz Skandinavien, grosse Teile Europas und zahlreiche weitere Regionen bekannt (Bergström, 1990, 1995). Seit 1993 wurde am SMHI das Grundmodell überarbeitet und weiterentwickelt und im Jahre 1996 mit HBV-96 eine neue Version herausgebracht (Lindström et al., 1997; Schwandt, 2004). Entwickelt wurde das HBV-light, welches eine einfache Struktur und eine hohe Benutzerfreundlichkeit aufweist, unter anderem durch Jan Seibert an der Universität Uppsala 1993. Die einfach zu bedienende Version des HBV-Modells wurde hauptsächlich für die Bildung sowie Lehre realisiert (Seibert und Vis, 2012).

C.1 Modellstruktur

C.1.1 Schneeroutine

Die Schneeroutine regelt den Schneedeckenaufbau sowie die Schneeschmelze (Abbau) und berechnet für jede Höhe- und Vegetationszone einzeln. Aus diesem Grund ist es möglich, in Einzugsgebieten mit grösserer vertikaler Ausdehnung die unterschiedlich ausgeprägte Schneeakkumulation und Schmelze zu erfassen. Als Eingangsgrössen werden die Niederschlagswerte sowie die Lufttemperaturdaten benötigt. Der Niederschlag bildet eine Schneedecke, wenn die Lufttemperatur unterhalb eines bestimmten Schwellenwerts TT [°C] (*threshold temperature*) liegt. Um den systematischen Messfehler bei der Messung des Schneefalls sowie mögliche Sublimation zu berücksichtigen, wird der feste Niederschlag mit dem Korrekturfaktor $SFCF$ [-] (*snowfall correction factor*) multipliziert. Die Schneeschmelze (Gl. 1), welche mit einem einfachen Grad-Tag-Verfahren und dem Gebrauch des Tag-Grad-Faktors $CFMAX$ [$\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{d}^{-1}$] berechnet wird, beginnt wenn die Lufttemperaturen oberhalb des Schwellenwerts TT [°C] liegen. Der Parameter CWH [-] (*coefficient of water holding*) zeigt an, bis zu welchem Punkt Schmelzwasser und Niederschlag in der Schneedecke gehalten werden. Sinkt die Lufttemperatur während der Schmelze unter den Schwellenwert TT [°C], kann das in der Schneedecke gespeicherte Wasser erneut gefrieren (Gl. 2), was mit dem Faktor CFR [-] (*coefficient of refreezing*) ausgedrückt wird (Bergström, 1992; Seibert, 2005; Seibert und Vis, 2012).

$$\text{Schmelzwasser pro Tag} = CFMAX \times (T(t) - TT) \quad (1)$$

$$\text{wiedergefrorenes Schmelzwasser pro Tag} = CFR \times CFMAX \times (TT - T(t)) \quad (2)$$

In früheren Untersuchungen wurden Werte für den Grad-Tag-Faktor $CFMAX$ von 1 bis 6 $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{d}^{-1}$ verwendet (Herrmann und Kuhn, 1990; Gray und Prowse, 1993). In einem sehr flachen Einzugsgebiet in Schweden wurden sogar maximale Werte bis zu 8 $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{d}^{-1}$ durch Kalibrierungen erreicht (Seibert, 1998). Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in der dort vorhandenen direkten Sonneneinstrahlung (keine Beschattung durch das Relief) und möglicherweise geringe Albedo (gealterter Schnee). In bewaldeten Gebieten ist von niedrigeren Werten auszugehen als in Gebieten mit Grünlandnutzung, bei denen es zu einer stärkeren Schmelze kommt (Uhlenbrook, 1999). Die Parameter CWH [-] und CFR [-] wurden von Bergström (1992) als konstante Werte von 0.1 bzw. 0.05 festgelegt, die auch im Rahmen dieser Arbeit für die Modellkalibrierung nicht weiter variiert wurden.

Für die Modellierung der Schneeschmelze gibt es dennoch wesentlich komplexere und physikalisch besser begründete Ansätze als die des HBV-light-Modells. Diese Ansätze basieren jedoch auf der Energiebilanz und benötigen umfangreiche Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile sowie Strahlungsmessungen (Uhlenbrook, 1999), welche für die untersuchten Gebiete nicht vorliegen.

C.1.2 Bodenroutine

Das Modul der Bodenroutine wird für jede Höhenzone einzeln berechnet, da der Niederschlag und das versickernde Schmelzwasser von der Höhenlage abhängen. In dieser Routine werden die im Boden ablaufenden Prozesse wie Wasserspeicherung und Versickerung sowie die Verdunstung zusammengefasst. Diese Routine enthält drei Parameter: FC [mm] (*field capacity*), BETA [-] und LP [-]. Der Parameter FC bestimmt die maximale Wassermenge, die im Boden zurückgehalten werden kann und ist ein reiner Modellparameter, welcher nicht mit dem Bodenkennwert „Feldkapazität“ übereinstimmen muss. Der Anteil (*recharge*) des Wassers am Eintrag N_s (Niederschlag und Schmelzwasser), der an die Abflussbildungsroutine weitergegeben wird, berechnet sich über das Verhältnis der aktuellen Bodenfeuchte und dem Modellparameter FC (Gl. 3) (Uhlenbrook, 1999; Sieber, 2003).

$$\frac{recharge}{N_s} = \left(\frac{S_{sm}}{FC} \right)^{BETA} \quad (3)$$

recharge: Anteil des Wassers, welches in die Abflussbildungsroutine weitergeleitet wird [-], N_s : Eintrag in die Bodenroutine [mm], S_{sm} : Bodenfeuchte [mm], FC: maximale Bodenwasserspeicherung [mm], BETA: Modellparameter [-] (aus Seibert, 1997).

In der Literatur werden Werte für BETA von 0.3 bis 6 (Braun und Renner, 1992; Harlin und Kung, 1992; Gurtz et al., 1997; Seibert, 1998) angegeben, wobei die meisten Anwendungen von Werten grösser 1 ausgehen. Generell bewirken tiefe BETA-Werte, dass mehr Wasser in das Abflussbildungsmodul weitergeleitet wird (Uhlenbrook, 1999; Sieber, 2003).

Der dritte Parameter LP [-] legt die aktuelle Evaporation E_a als Anteil der potentiellen Evaporation E_p fest. Ist die aktuelle Bodenfeuchte geringer als das Produkt aus LP und FC, wird sie gemäss der untenstehenden Abbildung 1 linear reduziert (Uhlenbrook, 1999; Sieber, 2003).

Bei vollständiger Entleerung des Bodenspeichers ($S_{sm}=0$) ist der Welkepunkt erreicht, somit steht der vorhandenen Vegetation kein Wasser zur Verfügung.

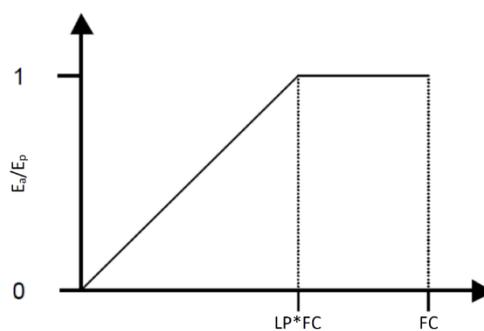


Abbildung 28.2: Reduktion der potentiellen Evaporation abhängig von der Bodenfeuchte (modifiziert nach Uhlenbrook, 1999).

C.1.3 Grundwasserroutine

Die Grundwasserroutine ist je nach Modellstruktur unterschiedlich aufgebaut und besteht in der Standard-Version aus zwei Grundwasserkästen, die übereinander angeordnet sind (Abb. 8). Der Niederschlag sowie das Schmelzwasser infiltriert zuerst in den oberen Grundwasserkasten SUZ [mm]. Der Parameter PERC [mm d⁻¹] legt anschliessend die maximale Perkolationsrate von der oberen in den unteren Grundwasserkasten SLZ [mm] fest. Der Abfluss aus den Grundwasserkästen wird aus der Summe von zwei oder drei linearen Ausflussgleichungen berechnet, je nachdem ob die SUZ über dem Grenzwert UZL [mm] liegt oder nicht. Die Menge des Abflusses wird somit durch den aktuellen Wasserstand und die drei Rezessionskoeffizienten K0, K1 und K2 [d⁻¹] festgelegt. K0 beschreibt das Rezessionsverhalten bei Spitzenabflüssen, K1 den Abfluss aus dem oberen Grundwasserkasten bei geringerem Wasserstand und K2 denjenigen aus dem unteren Grundwasserkasten. Bei Niedrigwasser ist nur der untere Grundwasserkasten gefüllt und somit wird das Rezessionsverhalten einzig durch den Parameter K2 beschrieben (Seibert, 2005; Seibert und Vis, 2012).

C.1.4 Wellenablaufroutine

Der Abfluss wird zum Schluss noch durch eine Gewichtungsfunktion namens MAXBAS [d] definiert und geglättet um schliesslich den simulierten Abfluss zu erhalten (Bergström, 1992; Seibert und Vis, 2005).

Zusätzlich zu diesen vier Routinen sind im HBV-Modell einige höhenabhängige Parameter integriert. PCALT [% / 100 m] und TCALT [°C / 100 m] beschreiben die Zu- bzw. Abnahme von Niederschlag und Temperatur in Abhängigkeit der Meereshöhe (Bergström, 1992; Seibert, 2005). Pelev und Telev geben die Referenzhöhen über Meer an, auf welcher die Niederschlags- und Lufttemperaturdaten erfasst wurden (Seibert, 2005). Bei den Temperatur- sowie Niederschlagsdaten handelt es sich um Gebietsangaben, welche mit Hilfe der Thiessen-Methode berechnet wurden. Analog zum Kapitel 3.2.1.1 wurde die Gleichungen für die Berechnung der Gebietsniederschläge und -temperaturen für die Berechnung von Pelev und Telev gebraucht. Für die Anpassung der Evaporation anhand von langjährigen Temperaturmittelwerten ist der Parameter C_{et} verantwortlich, welcher im Kapitel 3.3.2 eingeführt wird (Seibert, 2005).

Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Elgg, 30.09.2015

David Reist